

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

**Vliv technologie svařování 141 a 131 na výsledné vlastnosti svarového
spoje slitiny EN AW 6082**

**Influence of the 141 and 131 Welding Methods on Properties of EN
AW 6082 Weld Joint**

Student:

Marek Vícha

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Vícha**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Vliv technologie svařování 141 a 131 na výsledné vlastnosti svarového spoje slitiny EN AW 6082
Influence of the 141 and 131 Welding Methods on Properties of EN AW 6082 Weld Joint

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor hliníkových slitin.
2. Proveďte hodnocení svařitelnosti vytvrditelných hliníkových slitin.
3. Navrhněte vhodné metody svařování vytvrditelných hliníkových slitin.
4. Navrhněte metodiku ověření vlastností svarových spojů slitiny EN AW 6082.
5. Bod 4 realizujte.
6. Proveďte diskuzi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

Koukal, J., Zmydlený, T. *Svařování*. VŠB-TU Ostrava, 2005.
Turňa, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Alfa, Bratislava, 1989.
Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. ZEROSS, Ostrava, 2001.
Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. ZEROSS, Ostrava, 1999.
Országh, V., Országh, P. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovů*. SAV, Bratislava, 1998.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Drahomíru Schwarzovi, CSc. za jeho cenné rady, připomínky a informace při zpracovávání této bakalářské práce.

Rovněž bych chtěl poděkovat za spolupráci firmě BZS MACHINERY, spol. s.r.o, jmenovitě panu Petru Nezdařilovi a panu Miroslavu Čeganovi.

V neposlední řadě patří poděkování také mé rodině.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2012

.....
Marek Vácha
.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3.).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012

Marek Vícha

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Marek Vícha

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sládkova 2988/27a, 702 00, Ostrava

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VÍCHA, M. *Vliv technologie svařování 141 a 131 na výsledné vlastnosti svarového spoje slitiny EN AW 6082 : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 72 s. Vedoucí práce: Schwarz, D.

Tato bakalářská práce se zabývá svařováním hliníkové slitiny EN AW 6082 metodami TIG 141 a MIG 131 v ochraně argonu a jejich vlivem na mechanické vlastnosti výsledného svarového spoje. V úvodu práce je obecně pojednáno o hliníku a jeho slitinách. Dále je zde nastíněna problematika svařování těchto materiálů s uvedením vhodných svařovacích metod. V experimentální části práce je proveden rozbor daného základního a přídatného materiálu a popsána metodika svařování. Práce pokračuje zkouškami zkušebních dílů a jejich vyhodnocením. V závěru je provedena diskuse a porovnání výsledků s teoretickými předpoklady.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VÍCHA, M. *Influence of the 141 and 131 Welding Methods on Properties of EN AW 6082 Weld Joint : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2012, 72 p. Thesis head: Schwarz, D.

This bachelor thesis is concerned with the welding of aluminium alloys termed EN AW 6082 using methods TIG 141 and MIG 131 under the protection of argon and their influence on mechanical properties of the resulting welding joint. This work opens with a general overview of aluminium and its alloys. A subsequent description of the issue of welding these materials which includes applicable welding methods. In the experimental part of the work an analysis was conducted of the given basic and additional material and welding methodology. This is followed with tests of trial pieces and their evaluation. The bachelor thesis is completed a discussion about results and a comparison with theoretical assumptions.

OBSAH

Seznam použitých značek a symbolů	9
Úvod.....	10
1 Hliník a slitiny hliníku, rozdělení a charakteristika.....	11
1.1 Výroba a základní vlastnosti čistého hliníku	11
1.1.1 Výskyt hliníku v přírodě a jeho výroba	11
1.1.2 Fyzikální vlastnosti hliníku.....	11
1.2 Hliníkové slitiny	13
1.2.1 Základní pojmy a rozpustnost legur.....	13
1.2.2 Legující prvky a jejich vliv na vlastnosti slitiny	14
1.3 Označování hliníku a hliníkových slitin	16
1.3.1 Značení podle ČSN 42 0055	16
1.3.2 Označování hliníku a hliníkových slitin podle ČSN EN 573	16
1.3.3 Označování hliníku a hliníkových slitin podle ČSN EN 1780	17
1.4 Tepelné zpracování	18
1.4.1 Žíhání	19
1.4.2 Vytvrzování – precipitační zpevnění	19
2 Svařitelnost hliníku a jeho slitin	22
2.1 Pórovitost svarů	23
2.2 Povrchové oxidy	24
2.3 Trhliny	25
2.4 Pokles pevnosti a tvrdosti vytvrzených hliníkových slitin	27
3 Metody svařování hliníku a jeho slitin	28
3.1 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou.....	28
3.1.1 Princip metody	28
3.1.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin	29
3.2 Obloukové svařování v ochranných atmosférách.....	30
3.2.1 Inertní plyny.....	30
3.2.2 Metoda TIG 141.....	31
3.2.2.1 Princip metody	31
3.2.2.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin	33
3.2.3 Metoda MIG 131	34
3.2.3.1 Princip metody	34
3.2.3.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin	35
3.3 Vysokoenergetické metody tavného svařování	36
3.3.1 Plazmové svařování	37
3.3.2 Elektronové svařování	37
3.3.3 Laserové svařování	38
3.4 Odporové svařování	39
3.5 Speciální metody tlakového svařování	40
3.5.1 Difúzní svařování.....	40
3.5.2 Tlakem za studena	40
3.5.3 Ultrazvuk	41
3.6 Friction stir welding.....	41
3.7 Návrh vhodných metod svařování	42
4 Ověřování vlastností svarových spojů	42
5 Experimentální část.....	44
5.1 Základní materiál a jeho charakteristika.....	44
5.2 Přídavný materiál a jeho charakteristika.....	45
5.3 Svařování slitiny EN AW 6082	46

5.3.1 Příprava svařovaných dílců.....	46
5.3.2 Svařování TIG.....	48
5.3.3 Svařování MIG	49
5.3.4 Teplo vnesené do svaru.....	49
6 Zkoušky svarových spojů a dosažené výsledky	50
6.1 Vizuální kontrola svarů (VT).....	51
6.2 Kapilární zkouška (PT).....	53
6.3 Radiografická kontrola (RT).....	54
6.4 Příčná zkouška tahem	56
6.5 Kontrola makrostruktury.....	58
6.6 Zhodnocení dosažených výsledků	62
Závěr.....	65
Použitá literatura	66
Seznam tabulek	69
Seznam obrázků	70
Přílohy.....	72

Seznam použitých značek a symbolů

111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
AC	střídavý proud
Al	hliník
Ar	argon
A/mm ²	ampér na milimetr čtvereční, jednotka proudového zatížení
CWS ANB	Česká svářečská společnost ANB
DC	stejnoseměrný proud
FSW	friction stir welding
GP1	Guinier-Prestonovy zóny – první typ
GP2	Guinier-Prestonovy zóny – druhý typ
GPa	gigapascal
He	hélium
Hz	hertz
MAG 135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
MIG 131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
MPa	megapascal
NDT	nedestruktivní zkoušení
O ₂	kyslík
PM	přídavný materiál
R _m	mez pevnosti
SK	svarový kov
TIG 141	obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu
TOO	tepelně ovlivněná oblast
WPS	specifikace postupu svařování
ZM	základní materiál
eV	elektronvolt
μm	mikrometr
s	sekunda

Úvod

V poslední době lze v oblasti svařování sledovat zrychlující se trend využívání nejen nových svařovacích metod, ale neustálý vývoj a pokrok je patrný i u nových druhů materiálů, ať už se jedná o oceli nebo o neželezné kovy a jejich slitiny. Tento trend pochopitelně vyvolává zvýšené nároky na pracovníky v oblasti svařování a jejich odborné znalosti. Tyto je možno získat samostudiem, praxí nebo účastí na různých seminářích a školeních. V současnosti je v České republice nejucelenějším systémem přeškolení a zvyšování kvalifikace systém CWS ANB, jehož součástí je i Svářečská škola Vícha-Weld, spol. s r. o. se sídlem ve Fulneku.

Všechny tyto vývojové trendy a změny ve svařování samozřejmě zasáhly i svářečskou školu, v níž pracuji. To se projevilo zvýšenou poptávkou po svářečských kurzech v oblasti svařování hliníku a jeho slitin. Z tohoto důvodu se výše uvedeným materiálům věnuje i tato bakalářská práce. Jejím cílem je ověřit předpoklad snížení hodnot mechanických vlastností vytvrditelných hliníkových slitin v důsledku svařování vybranými metodami.

V úvodní kapitole této práce je pojednáno o hliníku a jeho slitinách. Jedná se zejména o rozbor jejich mechanických, chemických a fyzikálních vlastností. Samostatné kapitoly jsou pak věnovány svařitelnosti hliníkových materiálů a metodám, které se pro jejich svařování používají. Praktická část práce je zaměřena na konkrétní vytvrditelnou slitinu EN AW 6082. Dílce z této slitiny byly svařovány ve firmě BZS MACHINERY, spol. s r.o. se sídlem v Bílovci. Polovina zkušebních dílců byla svařena metodou TIG 141, druhá polovina metodou MIG 131. K ochraně svarové lázně byl použit argon o čistotě 99,998 %, využívaný ve výrobě. Na svařených dílcích byly poté provedeny potřebné zkoušky. Jmenovitě se jedná o zkoušky vizuální, radiografickou, metalografickou a příčnou zkoušku tahem. Zhodnocení dosažených výsledků je uvedeno v závěru.

1 Hliník a slitiny hliníku, rozdělení a charakteristika

Hliníkové konstrukční materiály se rozdělují do dvou základních skupin. Rozhodujícím kritériem je procentuální obsah hliníku v daném materiálu.

- technický hliník (obsah minimálně 99 % Al)
- hliníkové slitiny (celkový obsah legur je větší než 1 %, zbytek je Al)

1.1 Výroba a základní vlastnosti čistého hliníku

1.1.1 Výskyt hliníku v přírodě a jeho výroba

Hliník je třetím nejrozšířenějším prvkem zemské kůry, dle odhadů je ho zde okolo 7,5 - 8,5 %. To z něj činí nejrozšířenější kov na Zemi. V čisté formě se však nevyskytuje. V přírodě je vázán ve sloučeninách, z nichž nejznámější jsou bauxit, kryolit a velmi tvrdý minerál korund (Al_2O_3). [11]

Technicky čistý hliník se vyrábí z bauxitu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ dihydrát oxidu hlinitého) a kryolitu ($\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$ – hexafluorohlinitan sodný) elektrolýzou jejich taveniny. Elektrolýzou lze vyrobit hliník o čistotě 99,3 až 99,8 %. Čistota takto vyrobeného hliníku závisí na podmínkách elektrolýzy a na čistotě vstupních surovin. Mezi hlavní nečistoty patří zejména železo, křemík a měď. Hliník vyšší čistoty se vyrábí rafinací elektrolytického hliníku, je možno dosáhnout velmi vysoké čistoty překračující 99,99 %. Další významnou možností výroby hliníku je zpracování druhotných surovin. [6] [8] [7] [14]

1.1.2 Fyzikální vlastnosti hliníku

Hliník řadíme mezi lehké kovy, má bělavě šedou barvu způsobenou povrchovou vrstvičkou Al_2O_3 . Hliník je za pokojové teploty pevná krystalická látka. Atomy hliníku krystalizují v plošně středěné kubické soustavě, z čehož vyplývají některé jeho vlastnosti jako je například jeho velmi dobrá tažnost za tepla i za studena. Hliník má velmi malou měrnou hmotnost, její velikost 2700 kg/m^3 jej řadí mezi lehké kovy. Dalšími podstatnými

vlastnostmi hliníku ovlivňujícími technologii svařování je jeho dobrá elektrická a tepelná vodivost.

Velmi významná je rovněž odolnost proti korozi, ta je způsobena tenkou vrstvou (cca 0,01 μm) Al_2O_3 vytvářející na povrchu hliníku film, který brání další korozi. Tato vrstva se někdy uměle zvyšuje oxidací za účelem zlepšení korozivzdornosti (eloxace) až na 25 μm . Oxid hlinitý je velmi tvrdý, oproti čistému Al má nižší tepelnou a elektrickou vodivost, což způsobuje problémy při svařování. Komplikace způsobuje rovněž značný rozdíl v teplotách tavení oxidu a čistého hliníku. Teplota tavení oxidu je 2050 $^{\circ}\text{C}$, čistého hliníku pak 658 $^{\circ}\text{C}$.

Pevnost v tahu hliníku Al 99,5 % je zhruba 70 MPa. Se stoupajícím obsahem nečistot pevnost a tvrdost hliníku roste, naopak klesá tažnost, elektrická a tepelná vodivost. Za nečistoty v technicky čistém hliníku se považují zejména železo a křemík. Jedná se o příměsi, které se do hliníku dostanou buď v průběhu výroby nebo se je naopak nepodaří zcela odstranit z výchozích surovin. Pevnost je možno dále zvýšit tvářením za studena, legováním nebo tepelným zpracováním (vytvrditelné slitiny hliníku). Naopak při vzrůstající čistotě hliníku jeho pevnost klesá a tažnost stoupá. Pro hliník o čistotě 99,99 % v žíhaném stavu se uvádí $R_m = 40$ až 50 MPa, pro hliník čistoty 99,7 % je $R_m = 60$ MPa. Přehled základních mechanických a fyzikálních vlastností je uveden v tabulce. [6] [4] [7] [12] [24]

Tabulka 1 – Mechanické a fyzikální vlastnosti hliníku Al 99,5 % [2] [8] [6] [4]

VELIČINA/VLASTNOST	JEDNOTKA	ČISTÝ HLINÍK
Protonové číslo		13
Elektronová konfigurace		[Ne] 3s ² 3p ¹
Měrná hmotnost při 20 $^{\circ}\text{C}$	[kg·m ³]	2 700
Teplota tavení	[$^{\circ}\text{C}$]	658
Teplota varu	[$^{\circ}\text{C}$]	2 270
Součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	234
Součinitel teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]	24,7·10 ⁶
Elektrická vodivost při 20 $^{\circ}\text{C}$	[S]	35
Pevnost v tahu	[MPa]	70
Tažnost	[%]	30 – 40

Tvrdost	[HB]	20
Modul pružnosti v tahu	[Gpa]	72/67 [4]

Technický hliník se dle jeho čistoty rozděluje do následujících skupin: [4]

- elektrovedný hliník má čistotu 99,85 % a vyšší (obsah nečistot maximálně 0,15 %)
- hliník pro potravinářství a chemický průmysl obsahuje maximálně 0,2 % nečistot
- hliník pro speciální účely má obsah nečistot maximálně 0,25 %
- hliník běžné jakosti má obsah nečistot maximálně 0,5 %

1.2 Hliníkové slitiny

Hliníkové slitiny je možno dělit podle různých kritérií, jsou to hlavně: [4] [6]

- chemické složení
- odolnost proti korozi
- způsob zpracování (tvářené slitiny a slitiny na odlitky)
- tepelné zpracování (tepelně vytvrditelné a tepelně nevytvrditelné)

1.2.1 Základní pojmy a rozpustnost legur

Chemicky čistý kov obsahuje pouze jeden druh atomů bez příměsí jiných prvků.

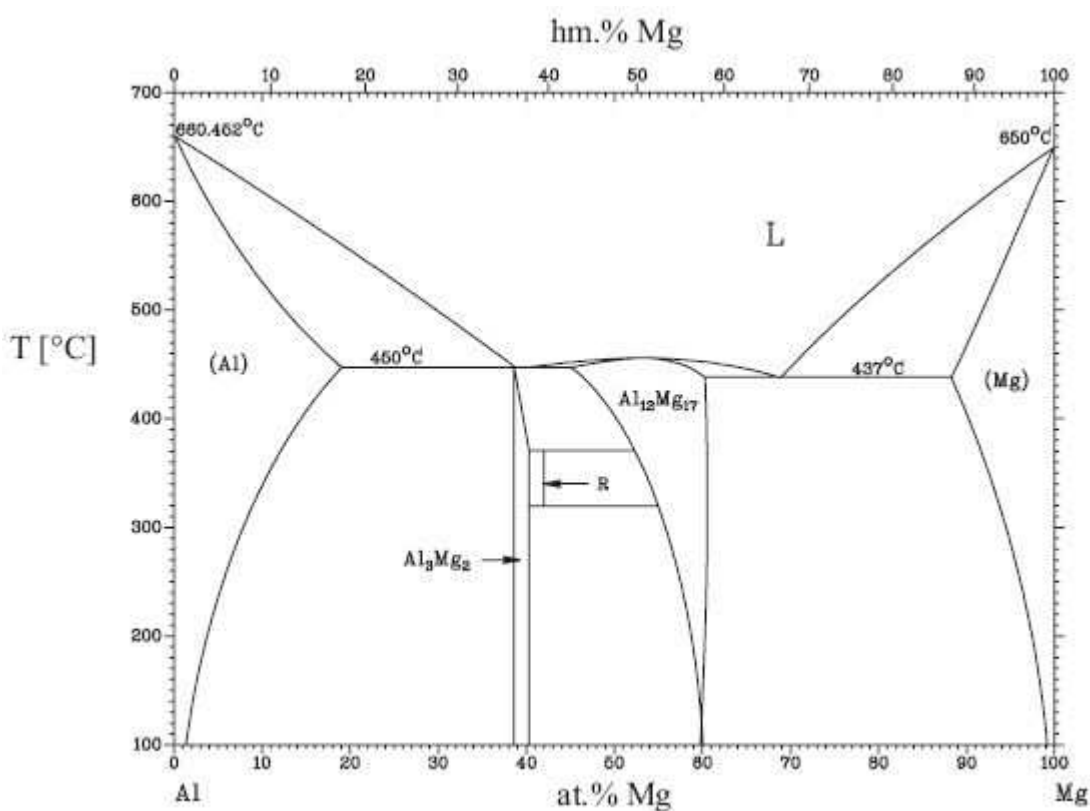
Technicky čistý kov je materiál o vysoké čistotě. Základní prvek je zde zastoupen v míře přesahující 99 % všech atomů. Hliník se považuje za technicky čistý, je-li v materiálu obsaženo minimálně 99 % Al, u mědi je to 99,5 %. [4]

Slitinou je nazývána směs dvou a více chemických prvků, z nichž bývá obvykle jeden základní. Slitiny pak mohou dostat název podle tohoto základního prvku nebo mít své vlastní originální pojmenování např.: slitina hliníku, slitina titanu, ocel, mosaz apod. Slitiny se nejčastěji vyskytují ve formě roztoků. [4]

Rozpustnost přísad není obecně stejná. Záleží na tom, o jakou přísadu se jedná, dále na základním prvku a na teplotě. Rozpustnost se dělí na:

- úplnou – prvky se mísí ve všech koncentracích (Cu-Ni)
- částečnou – prvky se mísí jen omezeně do určité koncentrace (Al-Cu), nazývané **mez rozpustnosti**
- žádnou – prvky se nemísí (např. S, P v ocelích) [4] [2]

Hliníkové slitiny jsou převážně nízkolegované. Rozpustnost roste s teplotou a naopak. Každá slitina má svůj vlastní diagram, ze kterého se dají tyto zákonitosti odečíst. Ukázka částečné rozpustnosti legujícího prvku v hliníku je na obrázku 1. Jedná se o binární diagram Al-Mg. Maximální rozpustnost hořčíku v hliníku je 17,4 % při teplotě 450 °C.



Obrázek 1 – Fázový diagram systému Al – Mg [15]

1.2.2 Legující prvky a jejich vliv na vlastnosti slitiny [12] [15]

Bor se přidává do slitin hliníku z důvodu zjemnění zrna a zvýšení elektrické vodivosti. Přídavek boru bývá velmi malý, max. 0,1 %. Rozpustnost částečná.

Bismut bývá přidáván do slitin hliníku z důvodu zlepšení obrobitelnosti, jinak není jako legující prvek příliš vhodný.

Chrom se přidává za účelem omezení škodlivého vlivu železa, protože snižuje náchylnost ke zhrubnutí zrna u slitin hliníku s hořčíkem. Rozpustnost chromu v hliníku je poměrně vysoká.

Měď je jedním z hlavních legujících prvků ve slitinách hliníku. Rozpustnost je až 19,7 % při eutektické teplotě. Má zpevňující účinek, snižuje však odolnost proti korozi.

Železo se v hliníkových slitinách vyskytuje vždy. Dostává se do nich buď jako nežádoucí prvek při výrobě nebo bývá přidáváno záměrně pro zvýšení pevnosti. Jeho obsah nebývá vyšší než 1 %, rozpustnost je velmi malá, hluboce pod touto hranicí.

Hořčík má maximální rozpustnost v hliníku cca 17,4 % při teplotě 450 °C, ve slitinách pro tváření bývá jeho obsah omezen na max. 7 %. Při vyšším obsahu Mg klesá odolnost proti korozi a také tvárnost. Hořčík výrazně zvyšuje pevnost slitin.

Mangan se přidává do slitin tepelně vytvrzovaných i nevytvrzovaných. Obecně zvyšuje pevnost tvářených slitin, může však způsobit i pokles plasticity. Zlepšuje vlastnosti hliníkových slitin tím, že snižuje jejich náchylnost k mezikrystalické korozi a korozi pod napětím.

Křemík zvyšuje odolnost proti otěru. Ve spojení s minimem přísad (např. Na, Sr) dochází ke zjemnění mikrostruktury a tím ke zlepšení mechanických vlastností.

Titan bývá ve slitinách s hliníkem přítomen prakticky vždy, neboť TiO₂ je obsažen v bauxitech. Ve výrobě hliníkových slitin se obvykle používá pro zefektivnění rafinace při lití. Další jeho dobrou vlastností je, že zjemňuje zrno.

Zinek má výbornou rozpustnost v hliníku, při teplotě cca 385 °C je to až 67 %. Slitiny s obsahem zinku nad 60 % vykazují superplasticitu.

1.3 Označování hliníku a hliníkových slitin

1.3.1 Značení podle ČSN 42 0055

V této normě z roku 1977 je rozveden princip číselného označování těžkých a lehkých neželezných kovů. V praxi má přednost značení podle ČSN EN. Číselné značení je složeno ze šestimístního základního čísla, za nímž zpravidla následuje dvoumístné číslo doplňkové. [18] [19]

ČSN 42 4203 . XX

- 42 - třída norem (42 značí hutnictví)
- 4 - lehké neželezné kovy (3 označuje těžké)
- 2 - tvářené kovy a slitiny
- 20 - dvojčíslí složené ze čtvrté a páté číslice stanovuje skupinu neželezných kovů
- 3 - pořadová číslice
- .XX - doplňkové dvojčíslí za tečkou udává stav, jakost a tepelné zpracování

Kovy s měrnou hmotností do 5 kg.dm^{-3} jsou označovány jako lehké, nad tuto hranici jako těžké. [19]

1.3.2 Označování hliníku a hliníkových slitin podle ČSN EN 573

Norma ČSN EN 573 stanovuje označování tvářených hliníkových materiálů. Norma se dělí na čtyři části, z nichž nejvýznamnější a nejpoužívanější je část 573-1: číselné označování. Označování chemickými značkami podle části 573-2 je chápáno jako alternativní. [9] [19]

EN AW 6082

- EN - úvodní předpona
- A - značí hliník
- W - tvářené výrobky

- XXXX - čtyři číslice určující chemické složení (viz. dále)

První řada je vyhrazena čistému hliníku, od řady 2000 se jedná o jeho slitiny podle hlavních slitinových prvků.

- řada 1000 - hliník
- řada 2000 - měď
- řada 3000 - mangan
- řada 4000 - křemík
- řada 5000 - hořčík
- řada 6000 - hořčík a křemík
- řada 7000 - zinek
- řada 8000 - jiné prvky
- řada 9000 - neobsazená řada [9]

1.3.3 Označování hliníku a hliníkových slitin podle ČSN EN 1780

Tato norma určuje označování litých hliníkových materiálů. Je rozdělena do tří částí. Nejpoužívanější je část 1780-1: číselné označování. Značení se od předešlé normy příliš neliší. [20]

EN AM – 91400

- EN - úvodní předpona
- A - značí hliník
- M - předslitina
- XXXXX - těchto pět číslic určuje mezní hodnoty chemického složení [20]

Stručný přehled některých základních hliníkových materiálů a jejich mechanické vlastnosti je uveden v tabulce 2.

Tabulka 2 – Značení a pevnost základních hliníkových materiálů [2] [21] [30]

Značení dle			Minimální R _m [MPa] ve stavu	
EN 573-1	EN 573-2	ČSN 42 0055		
Technický hliník			Žíhaném	Vytvrzeném
EN AW 1080	EN AW-Al99,8	ČSN 42 4002	50	100
EN AW 1050	EN AW-Al99,5	ČSN 42 4005	70	130
Slitiny tepelně nezpracovatelné				
EN AW 5019	EN AW-AlMg5	ČSN 42 4415	250	350
EN AW 5251	EN AW-AlMg4,5Mn0,7	ČSN 42 4412	180	270
EN AW 5754	EN AW-AlMg3	ČSN 42 4413	200	300
Slitiny tepelně zpracovatelné				
EN AW 2017	EN AW-AlCu4MgSi	ČSN 42 4201	180-240	380-400
EN AW 2024	EN AW-AlCu4Mg1	ČSN 42 4203	180-240	430-450
EN AW 7020	EN AW-AlZn4,5Mg1	ČSN 42 4441	180-200	300-360
Slitiny slévárenské			Minimální R _m [MPa] ve stavu	
Značení dle				
EN 1706		ČSN 42 0055		
číselné značení	chemické složení		Žíhaném	Vytvrzeném
EN AC 44300	EN AC-AlSi12(Fe)	ČSN 42 4330	170-220	-
EN AC 43000	EN AC-AlSi10Mg	ČSN 42 4331	180	240
EN AC 51400	EN AC-AlMg5(Si)	ČSN 42 4515	160-200	-

1.4 Tepelné zpracování

„Ve smyslu ČSN 42 0056 lze tepelné zpracování hliníku a jeho slitin definovat jako pochod, při kterém jsou výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury/substruktury a vlastností.“ [15]

Aby bylo dosaženo požadované struktury a vlastností je třeba dodržet rychlost ohřevu a ochlazování a také dobu výdrže na potřebné teplotě. Tepelné zpracování hliníkových slitin pro tváření a pro odlévání se v zásadě příliš neliší, zahrnují se proto do jednoho celku. Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin je rozděleno na **žíhání** a na **vytvrzování**. [12]

1.4.1 Žíhání

Rekrystalizační žíhání se provádí nejčastěji při teplotách 250 až 500 °C. Toto žíhání se používá u kovu tvářeného za studena. Původní struktura deformovaná tvářením rekrystalizuje, pevnostní vlastnosti se sníží. Plastické vlastnosti naopak vzrostou. Teplota žíhání se volí podle velikosti deformace za studena a chemického složení materiálu. Rekrystalizační teplota se snižuje s rostoucí deformací a u technického hliníku také s růstem jeho čistoty. Někdy se také provádí **žíhání s částečnou rekrystalizací**, vzniká tak struktura, v níž jsou jak rekrystalizovaná zrna tak i tvářená struktura. [15]

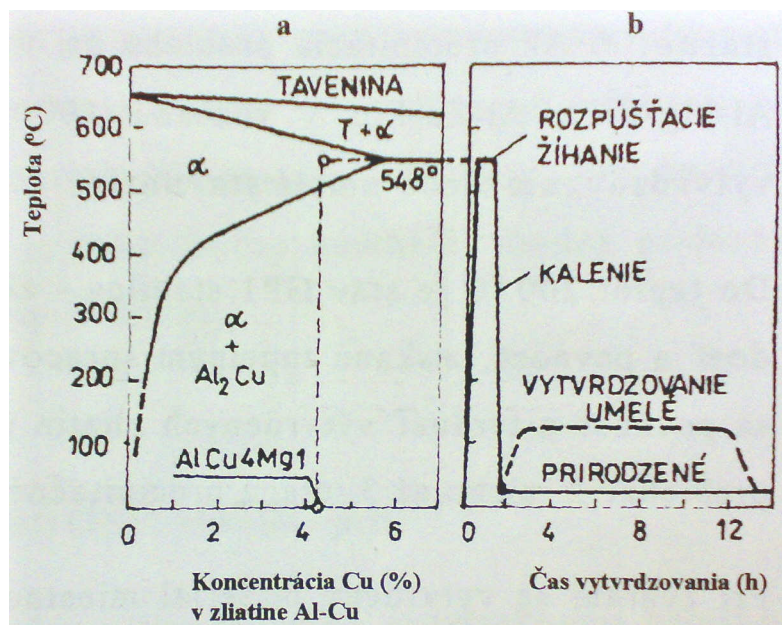
Stabilizační žíhání se provádí za účelem stabilizace struktury, mechanických, chemických a fyzikálních vlastností, popřípadě rozměrů součástí. Toto žíhání se provádí, má-li slitina v provozu pracovat za zvýšené teploty, nebo jestliže při tom dochází k jejímu zahřívání. Teplota žíhání leží většinou v rozmezí 240 až 350 °C, musí být vyšší než je maximální předpokládaná pracovní teplota. [15]

Žíhání ke snížení pnutí se obvykle provádí při teplotách v rozmezí 300 až 400 °C. Žíhá se pod rekrystalizační teplotu s předepsanou dobou výdrže na žíhací teplotě. Následuje řízené ochlazování výrobku minimálně do teploty 200 °C. [15]

Homogenizace se provádí při teplotě blízké teplotě solidu. Smyslem tohoto procesu je odstranění nebo alespoň částečné snížení chemické heterogenity pomocí difúzních procesů. Poměrně často je možno se setkat i s homogenizací dvoustupňovou. Doba žíhání je závislá v první řadě na chemickém složení slitiny a její struktuře, časově se jedná o nejdelší tepelné zpracování v průběhu výroby. [15]

1.4.2 Vytvrzování – precipitační zpevnění

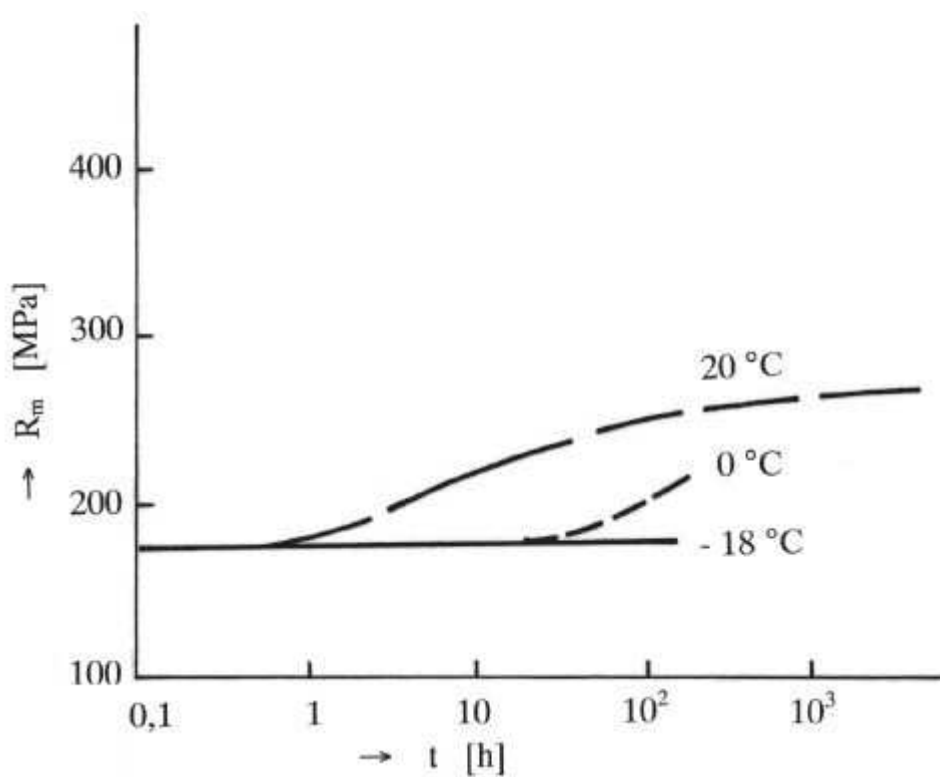
Za pomoci vytvrzování je možno poměrně značně měnit mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti hliníkových slitin. Nutnou podmínkou aplikace tepelného vytvrzování je, aby obsah legury ve vytvrzované slitině byl na horní hranici její maximální rozpustnosti v hliníku a současně tato rozpustnost výrazně klesala s teplotou. Vytvrzování se dělí na tři stádia. [15] [4]



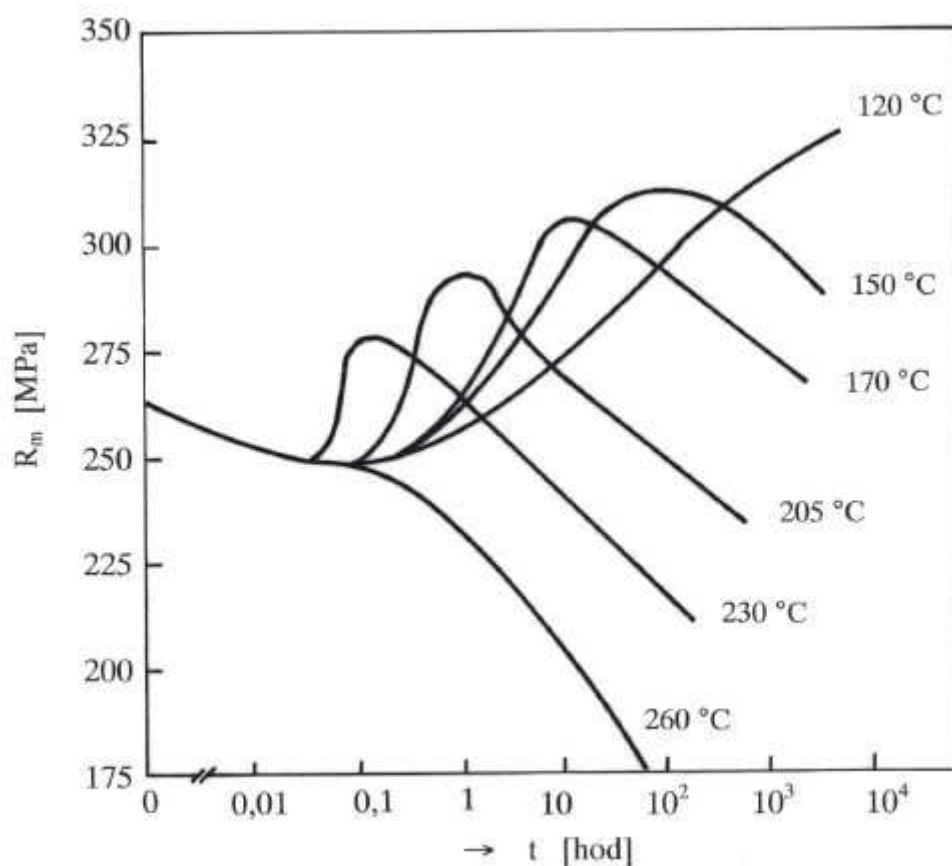
Obrázek 2 – Princíp a časový průběh tepelného zpracování vytvrzováním [4]

- Rozpouštěcí žíhání – jedná se o ohřev na potřebnou teplotu k rozpuštění intermetalických fází do tuhého roztoku. Je nutná určitá doba výdrže na rozpouštěcí teplotě tak, aby proces mohl proběhnout. [15]
- Kalení – následuje bezprostředně po rozpouštěcím žíhání. Prudkým ochlazením ze žíhací teploty vzniká přesycený tuhý roztok. Je nutno zajistit, aby rychlost ochlazení byla minimálně rovna kritické rychlosti ochlazení. „Jedná se o nejmenší rychlost ochlazení z rozpouštěcí teploty, při které nastává rozpad přesyceného tuhého roztoku.“ Nejpoužívanějším kalícím prostředkem je voda. [15]
- Stárnutí je precipitační proces, při němž dochází ke změně substruktury slitiny a tím i ke změně jejích vlastností. Jestliže k němu dochází za pokojové teploty, tj. při 20 °C, pak tento proces nazýváme přirozené stárnutí. To je typické například pro slitiny na bázi Al-Cu-Mg. U některých typů slitin však k rozpadu přesyceného tuhého roztoku dochází až při vyšších teplotách. Třeba slitiny typu Al-Zn-Mg nebo Al-Mg-Si je nutno zahřát na teplotu 100–180 °C. Tento proces nazýváme umělým stárnutím. Teplota stárnutí a čas potřebný k proběhnutí všech substrukturních změn se určuje z křivek kinetiky rozpadu. Na začátku procesu stárnutí vznikají difúzní zóny GP1. Jedná se o jednovrstvý koherentní precipitát. V etapě vzniku zón GP1 vykazují slitiny největší tvrdost a pevnost. V dalším průběhu procesu se z původních monoatomových vrstev začínají tvořit vícevrstvé destičkové útvary tzv. GP2. Při příliš dlouhé době umělého vytvrzování může dojít i k tzv. přestárnutí slitiny, dojde k poklesu pevnosti a tvrdosti. [15] [4] [10]

Na následujících obrázcích je uvedena kinetika rozpadu přesyceného tuhého roztoku slitiny EN AW 6262.



Obrázek 3 – Přirozené stárnutí - slitina EN AW 6262 [15]



Obrázek 4 – Umělé stárnutí - slitina EN AW 6262 [15]

2 Svařitelnost hliníku a jeho slitin

„Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, lze-li odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, jež se týkají jak vlastností samotných spojů, tak i vlivu těchto spojů na konstrukční celek, jehož součástí tyto spoje jsou.“ [1]

Technický hliník je dobře svařitelný, při použití metod, které zajistí rozrušení povrchové vrstvy oxidu hlinitého. Hliníkové slitiny jsou z důvodu omezené rozpustnosti legur v hliníku většinou nízkolegované. Legující prvky ovlivňují podstatnou měrou v závislosti na jejich procentuálním obsahu a vzájemné kombinaci svařitelnost. Za hlavní problémy při svařování hliníku a jeho slitin je možno považovat pórovitost svarů, sklon ke vzniku horkých trhlin ve svarech, přítomnost povrchové oxidické vrstvy Al_2O_3 a markantní pokles pevnosti svaru u vytvrditelných slitin. Na základě srovnání

jednotlivých ukazatelů svařitelnosti (celistvost, R_m , chemické složení) je možno hliník a jeho slitiny rozdělit do dvou skupin: [2] [4]

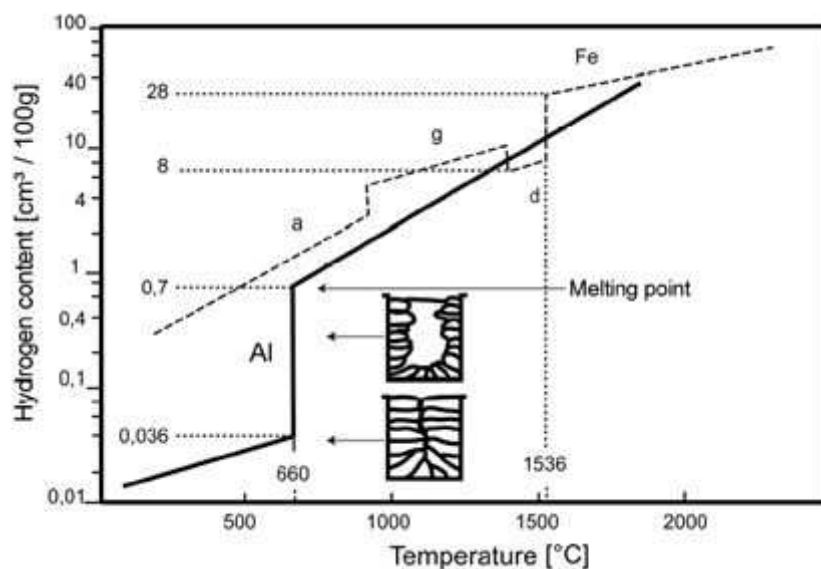
- materiály s dobrou svařitelností (Al, Al-Mg, Al-Mn, Al-Si)
- materiály se špatnou svařitelností (Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn)

Další vlastností hliníku, jež má přímý vztah ke svařitelnosti je jeho velká tepelná vodivost. Dochází k velkému odvodu tepla, což komplikuje místní natavení při svařování. Zejména při svařování větších tloušťek je třeba použít přehřev nebo směs Ar-He. [4]

Modul pružnosti v tahu hliníku je v porovnání se železem třetinový. To má za následek, že při svařování hliníkových materiálů existuje velké riziko deformací svařence. [4]

2.1 Pórovitost svarů

Pórovitost svarů je jedním ze základních problémů při svařování hliníku. Je způsobena přítomností vodíku ve svaru. Jak je patrné z obrázku 5 roste rozpustnost vodíku v hliníku se stoupající teplotou. Kritickým místem je fázová přeměna z likvidu na solidus, kdy za teploty 660 °C se může v hliníku Al 99,5 rozpustit až 0,7 ml/100g svarového kovu, kdežto v solidu při teplotě 658 °C je to pouhých 0,036 ml/100g svarového kovu. [22] Jelikož se jedná o velmi prudkou změnu rozpustnosti na malém intervalu teplot, nestačí všechen vodík absorbovaný v tavné lázni uniknout. Jeho část zůstane uzavřena v tuhém roztoku, kde vytváří vady typu dutin. Uvolňování vodíku dále pokračuje s klesající teplotou. Jelikož nadměrná přítomnost vodíku ve svaru způsobuje vnitřní pnutí, může dojít až ke vzniku trhlin.



Obrázek 5 – Rozpustnost vodíku v hliníku [23]

Při svařování hliníkových materiálů je proto nutné snažit se o snížení přítomnosti vodíku ve svarovém kovu. Před zahájením svařování je třeba odstranit ze svarových ploch a jejich okolí všechny nečistoty (zejména organické), povrchové oxidy či případnou vlhkost. Dále je nutno použít kvalitní přídavné materiály s co nejnižším obsahem vodíku a řádně vysušené. Svařuje-li se s ochranným plynem, musí být tento vysoce čistý. Při samotném svařování může dojít k přehřátí svarové lázně a s tím související její navodňování. Přehřátí lázně je možno zamezit snížením přívodu tepla do svaru, například zvýšením rychlosti svařování nebo použitím pulzního proudu. [4] [2]

2.2 Povrchové oxidy

Na povrchu hliníku a jeho slitin vzniká v důsledku reakce se vzdušným kyslíkem vrstvička Al_2O_3 . Teplota tavení této vrstvy je 2050 °C, což je zhruba trojnásobek teploty tavení hliníku, navíc je velmi tvrdá. Svými vlastnostmi zhoršuje svařitelnost, mohou vznikat neprůvary a rovněž se ztíží zapalování oblouku. Před svařováním je proto nutno ji odstranit, to se provádí například broušením, kartáčováním nebo mořením vhodným chemickým činidlem. Očištěný materiál je nutno začít svařovat co nejdříve, protože nová oxidická vrstva se začíná tvořit prakticky okamžitě. Čas mezi čištěním a svařováním nesmí být delší než tři hodiny. Další možností je využití čistícího účinku argonu. Při ručním obloukovém svařování metodou TIG se používá střídavý proud, k čistícímu účinku dochází v půlperiodě, kdy je elektroda kladným pólem. Vlivem dopadu kationtů na povrch

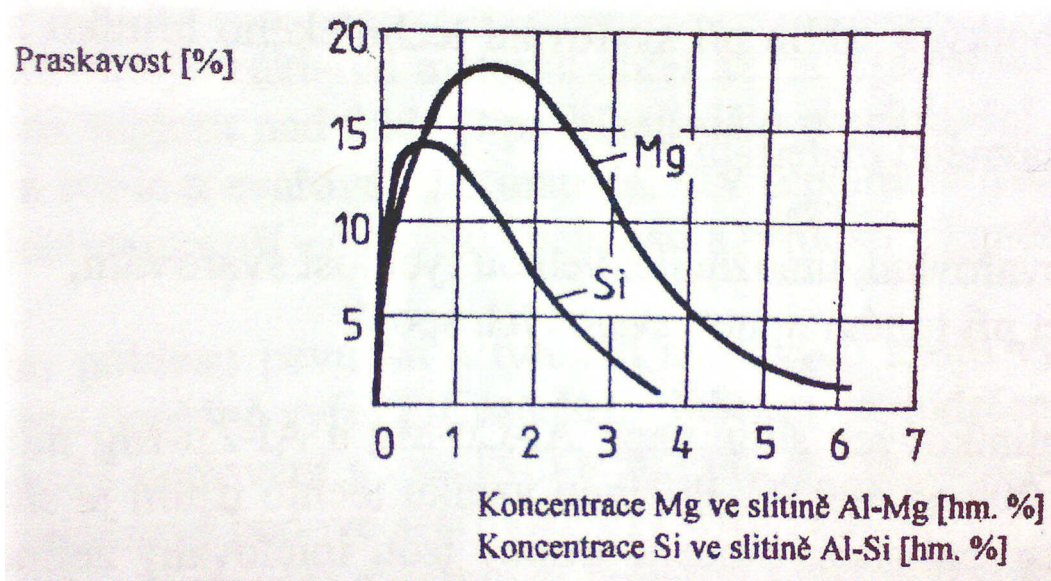
materiálu dochází k rozrušování oxidické vrstvy. Další možné vysvětlení tohoto jevu se opírá o nižší ionizační energii Al_2O_3 oproti Al. [4] [2]

2.3 Trhliny

Při svařování hliníku a jeho slitin je velmi častým jevem vznik trhlín. Ty vznikají nejen v samotném svarovém kovu, ale i v TOO. Z hlediska teplot, při kterých vznikají, se dělí na horké trhliny a studené trhliny.

Horké trhliny vznikají v průběhu krystalizace svarové lázně. Různé druhy hliníkových slitin se vzájemně liší svou náchylností ke vzniku tohoto typu trhlín. Větší náchylnost vykazují svary se širokým intervalem tuhnutí. Šířku tohoto intervalu negativně ovlivňují nečistoty vytvářející nízkotavitelná eutektika. To vysvětluje, proč je technický hliník nižší čistoty náchylnější na praskavost než stejný materiál vyšší jakosti. Dodatečnou podmínkou je přítomnost tahových napětí, které jsou však při tavném způsobu svařování kovů přítomny ve svaru vždy. [2] [4]

Rovněž různé druhy legur a také jejich koncentrace mají vliv na praskavost. Na obrázku 6 je vynesena závislost praskavosti v procentech na koncentraci legujícího prvku. Pro každý typ slitiny hliníku existuje takzvaná kritická hodnota legujícího prvku, kdy je riziko vzniku horkých trhlín největší. [2] [4]

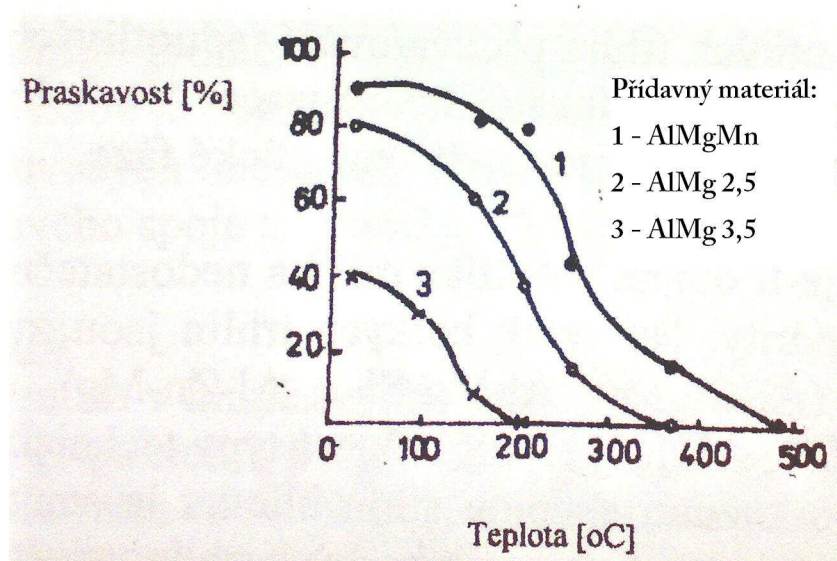


Obrázek 6 – Závislost praskavosti na koncentraci legujícího prvku [2]

Zvyšuje-li se koncentrace legujícího prvku nad tuto kritickou hodnotu, praskavost klesá, až se při dosažení určitých hodnot blíží k nule. Vysvětluje se to tím, že s rostoucím procentem legury ve slitině roste množství eutektika vyplňujícího prostory mezi dendrity při krystalizaci. Toto zjištění se s výhodou používá v praxi při volbě vhodného přídatného materiálu. Vliv na vznik horkých trhlin má rovněž zvolená svařovací technologie, svařovací parametry, tuhost svařence a teplota předehřevu. [2] [4]

Potlačit praskavost svarových spojů hliníkových materiálů lze využitím některé z následujících možností nebo jejich kombinací, jako jsou například: [2] [4]

- volba vhodného PM
- omezení tepelného příkonu do svaru
- volba vhodné technologie svařování
- předehřev



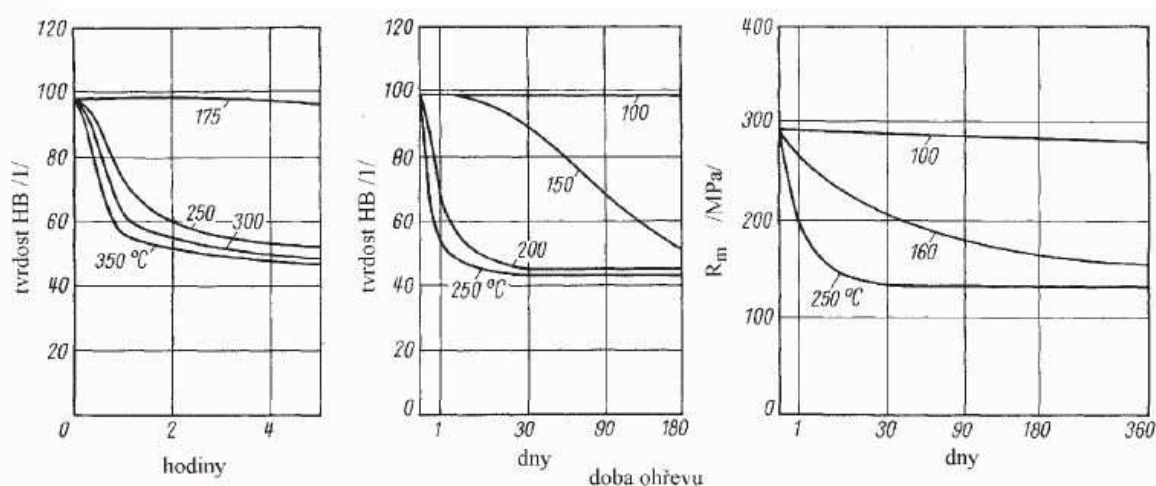
Obrázek 7 – Vliv teploty předehřevu a PM na praskavost slitiny AlMg2 [2]

Studené trhliny vznikají oproti teplým trhlinám při nižších teplotách a jen u některých typů hliníkových slitin. Jedná se např. o Al-Cu-Mg nebo Al-Zn-Mg. Obvykle to bývá v rozmezí teplot od 200 do 400 °C při chladnutí svaru. Vlivem tahových zbytkových napětí, přítomnosti vodíku ve svaru a rovněž struktury citlivé na jeho působení pak dojde ke vzniku trhliny. Povrch studených trhlin je na rozdíl od trhlin horkých lesklý, neoxidovaný. Studené trhliny mají transkrystalický charakter. Náchylnější k tomuto typu trhlin jsou vlivem nižších plastických vlastností a hrubozrnné struktury slévárenské slitiny.

Aby se zamezilo vzniku tohoto typu trhlin, je vhodné dílec po svařování ochlazovat pozvolna. Dále je třeba minimalizovat přítomnost vodíku ve svarech. [4] [2]

2.4 Pokles pevnosti a tvrdosti vytvrzených hliníkových slitin

Vytvrzované hliníkové slitiny si zachovávají svou pevnost a tvrdost pouze do teploty kolem 200 °C. Každé překročení této teploty s sebou nese riziko poklesu pevnostních vlastností. Ten je tím větší, čím je vyšší teplota ohřevu, až při teplotě nad 400 °C poklesnou pevnostní charakteristiky na hodnoty ve vyžíhaném stavu. Při tavném svařování tato hodnota musí být nutně překročena, to znamená pokles pevnostních vlastností materiálu v závislosti na teplotě daného místa. K největšímu poklesu pevnosti a tvrdosti dochází v TOO v pásmu přehřátí. Při svařování začnou v celé oblasti TOO zahřáté nad teplotu 200 °C probíhat další děje. Např. pro slitinu Al-Cu je typický vznik nekoherentní stabilní intermetalické fáze Al_2Cu . Snížení či ztráta koherence se negativně projeví na pevnostních charakteristikách slitiny. [10] Na průběh odpevňovacích procesů má výrazný vliv nejen teplota, ale i čas, po který je materiál působení této teploty vystaven. Příklad těchto dějů je uveden na obrázku 8. [2] [15]



Obrázek 8 – Vliv předchozího ohřevu na tvrdost a pevnost stanovenou při 20 °C u slévarenské slitiny G-AlSi10Mg, která byla před ohřevem ve stavu po umělém stárnutí [15]

Použitelné metody pro omezení poklesu pevnostních charakteristik vytvrzovaných hliníkových slitin: [2]

- svařovací metody s vysokým teplotním gradientem v místě svaru

- svařovací metody mající nižší pracovní teplotu, než je teplota, při které již dochází k poklesu pevnostních vlastností
- svar a jeho okolí po svařování opět tepelně zpracovat vytvrzováním

3 Metody svařování hliníku a jeho slitin

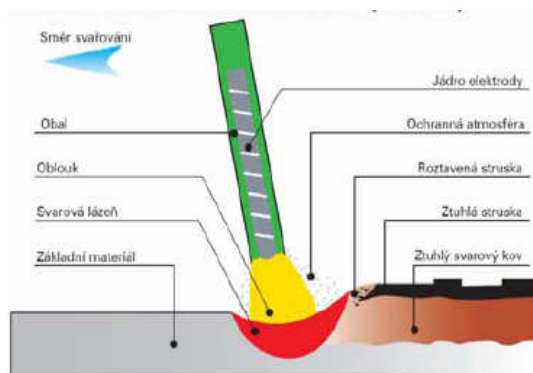
Pro svařování hliníku a jeho slitin je možno využít celou řadu různých svařovacích metod. V průmyslové praxi jsou nejvíce rozšířeny metody TIG 141 a MIG 131. Dalšími vhodnými možnostmi jsou např. obloukové svařování obalenou elektrodou, elektronovým nebo laserovým paprskem, plazmou, odporové svařování, difúzní, ultrazvukové, tlakem za studena a rovněž poměrně nová technologie friction stir welding. [2]

3.1 *Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou*

V posledních letech tato metoda svařování poněkud ustupuje do pozadí a je nahrazována novými progresivnějšími metodami. Významnou úlohu si však ponechává zejména v údržbě a rovněž při svařování ve venkovním prostředí.

3.1.1 Princip metody

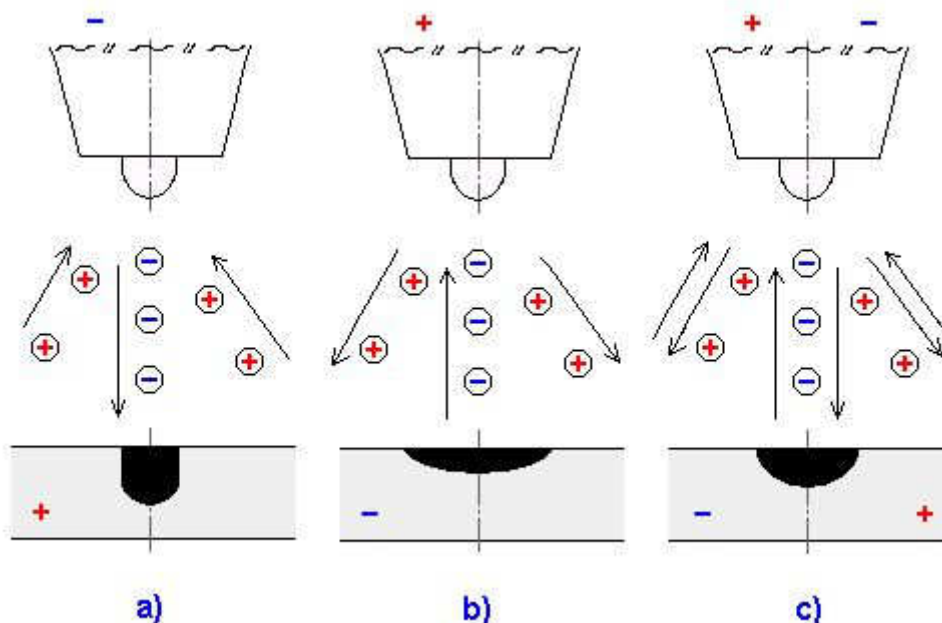
Zdrojem tepla je zde elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a základním materiálem. Oblouk využívaný ve svařování je nízkonapěťový vysokotlaký elektrický výboj. Pro stabilní hoření oblouku je potřeba dostatečně vysoké napětí a proud, aby bylo dosaženo ionizace prostředí a jeho udržení v tomto stavu. [27] [3]



Obrázek 9 – Svařování obalenou elektrodou [28]

3.1.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin

Při svařování hliníku a jeho slitin obalenou elektrodou je třeba dbát na správné zapojení elektrody. Používá se výhradně zapojení s nepřímou polaritou. Při tomto zapojení se plně projeví tzv. čistící účinek elektrického oblouku. Ten se vysvětluje tím, že katodová skvrna jakožto místo s nejvyšší emisí elektronů se přesouvá do oblasti s nejvyšším elektrickým potenciálem. To v případě hliníku odpovídá oblasti zvýšeného výskytu Al_2O_3 . Dochází pak k odpařování oxidu způsobeným katodovou skvrnou. [24]



Obrázek 10 – Možnosti zapojení elektrody a vliv na průvar. a) DC – přímá polarita, b) DC – nepřímá polarita, c) AC [24]

Technologie svařování hliníku metodou 111 není příliš odlišná od svařování ocelí. V průmyslové výrobě se nepoužívá, uplatnění nachází při opravách a údržbě.

Nedoporučuje se používat tuto metodu pro svary mechanicky namáhané nebo vystavené agresivnímu koroznímu prostředí. [2]

Zvýšenou pozornost je třeba věnovat skladování a sušení elektrod z důvodu náchylnosti hliníkových materiálů na navodňování. Hlavní funkce obalu elektrod jsou: [24] [2]

- hořením vzniká plyn chránící tavnou lázeň před přístupem vzduchu
- jsou v něm obsaženy prvky pomáhající rozpouštění Al_2O_3 , obaly obsahují chloridy, fluoridy a kryolit
- stabilizace elektrického oblouku
- formování svarové housenky
- legující funkce
- dobře odstranitelná struska

3.2 Obloukové svařování v ochranných atmosférách

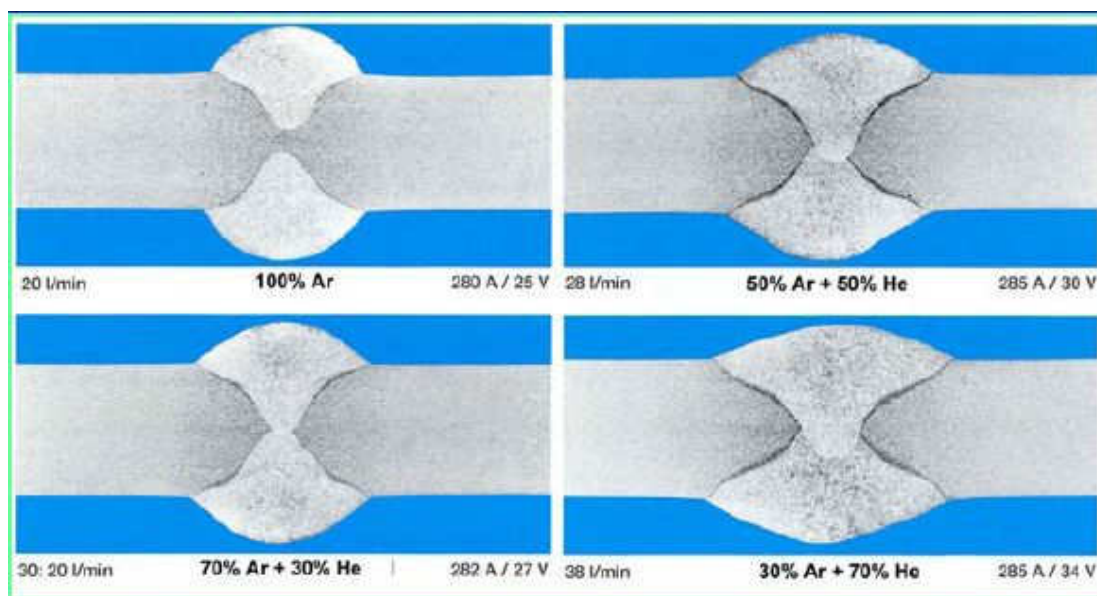
V současnosti nejvíce používaný způsob svařování hliníkových materiálů. Podstatou těchto metod je hoření elektrického oblouku v ochranné atmosféře chránící tavnou lázeň a elektrodu před přístupem vzduchu. Ochranný plyn musí rovněž pozitivně působit při zapalování oblouku a umožnit jeho stabilní hoření. Ochranná atmosféra může být aktivní nebo inertní. Pro svařování hliníku a jeho slitin je nutno k ochraně svarové lázně používat výhradně inertní plyny, popř. jejich směsi. Technologie je možno dále rozlišit podle toho, zda je použita tavící se (MIG 131) nebo netavící se (TIG 141) elektroda. Obě výše uvedené metody nalezly široké uplatnění při svařování hliníkových materiálů.

3.2.1 Inertní plyny

Tyto plyny a jejich směsi, na rozdíl od plynů aktivních, nereagují s tavnou lázní. Nezpůsobují tedy propal prvků. Při svařování hliníku a jeho slitin je důležitá zejména jejich netečnost ve smyslu oxidace a tím tvorby nežádoucího Al_2O_3 . Při svařování se používají hélium, argon nebo jejich směsi. Oba tyto plyny jsou bezbarvé, bez chuti a zápachu, nejedovaté a nehořlavé. Hélium je asi 7× lehčí než vzduch, argon je pak 1,3× těžší než vzduch. Tepelná vodivost argonu je v porovnání s héliem malá. Ionizační

potenciál argonu rovněž není příliš vysoký, je to 15,8 eV, to umožňuje dobré zapálení oblouku a jeho stabilitu. Naproti tomu je ionizační potenciál helia se svými 24,6 eV vysoký. Oblouk se špatně zapaluje a jeho stabilita je horší. V praxi se často využívají směsi těchto plynů, které v sobě kombinují vlastnosti jednotlivých složek. [3]

Vliv složení směsi Ar-He na průvar je znázorněn na obrázku 11. Je třeba dále upozornit na nutnost zvýšení průtoku ochranného plynu a také velikosti napětí při zvyšujícím se podílu hélia.



Obrázek 11 – Složení plynu a jeho vliv na průvar [28]

3.2.2 Metoda TIG 141

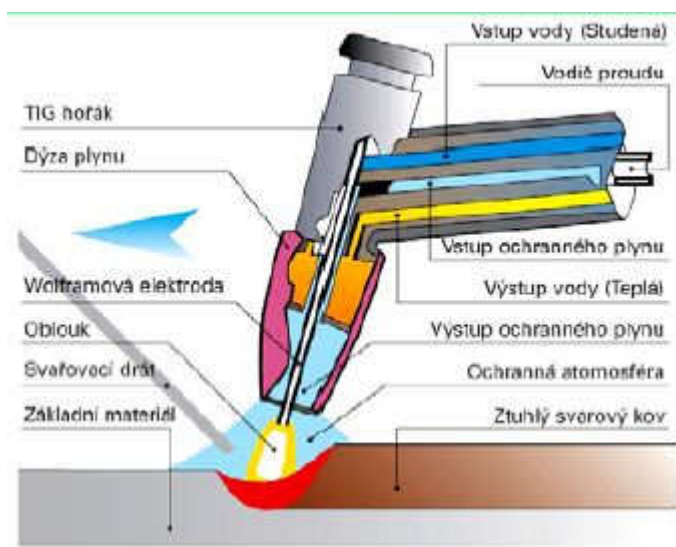
Metoda TIG (tungsten inert gas) bývá často označována i jako WIG (wolfram inert gas) nebo je také možno setkat se s americkým označením GTAW (gas tungsten arc welding).

3.2.2.1 Princip metody

Stejně jako u metody 111 je zde zdrojem tepla elektrický oblouk a platí pro něj vše, co je uvedeno v kapitole 3.1.1. Oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. K ochraně svarové lázně a elektrody se používá výhradně inertní plyn vysoké čistoty přesahující 99,99 %. Ke svařování touto metodou je možno použít jak

zdroje střídavého, tak i stejnosměrného napětí. U stejnosměrných zdrojů se využívá zapojení s přímou i nepřímou polaritou. Druh použitého proudu a způsob zapojení elektrody se řídí typem svařovaného materiálu a dalšími technologickými požadavky, jako je např. tepelné zatížení elektrody. Zapalovat oblouk lze dotykově zkratem nebo bezdotykově za využití vysokofrekvenčního vysokonapěťového ionizátoru. Z těchto dvou metod zapalování oblouku lze jednoznačně doporučit bezdotykové zapálení. Dotykem wolframové elektrody totiž s velkou pravděpodobností dojde k jejímu znehodnocení základním materiálem a v něm naopak ke vzniku wolframových vměstků.

Metoda 141 je vhodná jak pro ruční, tak i pro strojní svařování, kde se přidávání drátu musí řešit automatickým integrovaným zařízením. Svařovat lze buď s přidáváním PM ve formě drátu nebo bez PM.



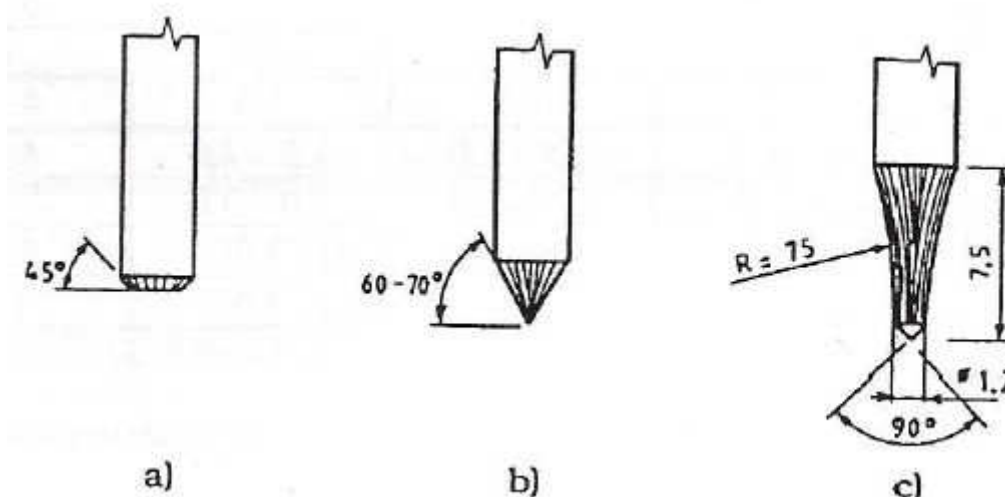
Obrázek 12 – Schéma svařování metodou 141 s přidáváním drátu [28]

Přídavný materiál může být buď ve formě tyček, jedná se o drát kruhového průřezu standardní délky 600-1000 mm, pro ruční svařování nebo ve formě drátu navinutého na cívce pro svařování strojní. PM obecně má plnit několik základních funkcí: [3]

- doplnění objemu svarového kovu ve svaru
- dolegování svarového kovu
- desoxidační
- odplyňovací
- metalurgická
- pomáhá formovat svar

- vhodnost pro svařování v polohách

Netavící se elektrody jsou vyráběny ze spékaného wolframu. Teplota tavení wolframu je 3380 °C. Elektrody mohou být buď jen z wolframu o čistotě 99,9 %, nebo jsou legovány oxidy některých kovů. Nejčastěji se používají: lanthan, thorium, cer, ytrium a zirkon. Legováním elektrod těmito oxidy se dosáhne podstatného snížení teploty ohřevu elektrody až o 1000 °C, čímž se zvýší její životnost. Žhavicí teplota legovaných elektrod naopak stoupne až na 4200 °C, pokud se leguje oxidem lanthaničitým. Zlepší se rovněž stabilita oblouku a usnadní se jeho zapalování. Obsah oxidů používaných pro legování elektrod se pohybuje v řádu od desetin procenta až po cca 4 procenta. Elektrody jsou na jednom z konců barevně označeny. Elektrody se před svařováním brousí do potřebného tvaru. Příklad je uveden na obrázku 13. [3] [4]



Obrázek 13 – Tvary konců elektrod po broušení. a) ruční svařování - AC, b) ruční svařování - DC, c) strojní svařování – DC [3]

Základní parametry svařování metodou 141 jsou elektrický proud, napětí a rychlost svařování.

3.2.2.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin

Pro svařování technického hliníku se používá střídavý proud. Metoda 141 je vhodná pro použití v rozsahu tlouštěk ZM od cca 1 až 10 mm. Větší tloušťky materiálu už není tak výhodné svařovat z důvodu omezené produktivity metody. Jako ochranný plyn se nejčastěji používá argon nebo jeho směs s héliem pro svařování větších tlouštěk.

Chemické složení PM má být stejné nebo velmi podobné, jako má ZM. Materiál větších tloušťek (od cca 8 mm) je třeba svařovat s předehřevem.

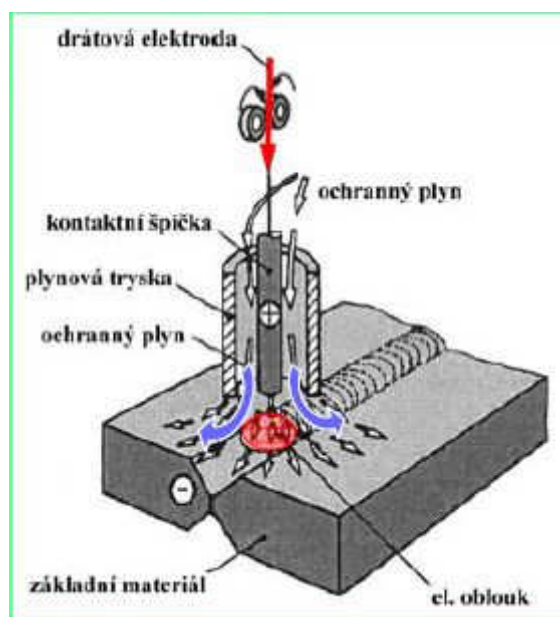
Pro svařování slitin hliníku platí obdobná doporučení. Přídavný materiál je však třeba volit podle konkrétních typů slitin. Pro plechy velmi malých tloušťek lze použít stejnosměrný proud s nepřímou polaritou. Vhodné je i použití impulsního proudu.

Hliník je možno svařovat i stejnosměrným proudem s přímou polaritou, za předpokladu použití směsi hélia a argonu v poměru minimálně 75:25. Vysoký obsah hélia předá do svarové lázně dostatečné množství tepla postačující k roztavení povrchové vrstvy Al_2O_3 . Roztavené oxidy se působením povrchových sil stahují na okraj taveniny. Toto zapojení je vhodné pro svařování rozměrných dílců. [3]

3.2.3 Metoda MIG 131

3.2.3.1 Princip metody

Jedná se o obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně inertního plynu. Oblouk hoří mezi tavící se elektrodou a základním materiálem. Funkci elektrody u této metody plní v podstatě přídavný materiál. Tento může být buď ve formě plného nebo plněného (trubičkového) drátu. Je navinut na cívce a do hořáku je nepřetržitě zajištěn jeho přísun pomocí podávacích kladek. Funkce PM jsou stejné jako u metody 141. Přívod proudu na elektrodu je zajištěn v hořáku kontaktním průvlakem. K ochraně svarové lázně a elektrody se používá inertní plyn.



Obrázek 14 – Princip svařování metodou MIG [28]

Jako zdroje proudu se dnes převážně používají svařovací invertory s plochou statickou charakteristikou. Svařuje se stejnosměrným proudem. Způsob zapojení elektrody se opět řídí typem svařovaného materiálu, požadavky na průvar, šířku housenky atd. Oblouk se zapaluje dotykově. [3]

Metoda 131 je vhodná jak pro ruční, tak i pro strojní svařování. Svařování touto metodou má vysokou produktivitu.

Základní parametry svařování metodou 131 jsou stejně jako u jiných metod obloukového svařování elektrický proud, napětí a rychlost svařování.

3.2.3.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin

Metoda 131 je pro své dobré vlastnosti a vysokou produktivitu nejpoužívanější technologií při svařování rozměrných hliníkových dílů. Při svařování středních a velkých tlouštěk je třeba použít přehřev. Doporučuje se přehřívát na 150 až 200 °C s ohledem na druh materiálu. Pro svařování tenkých dílců nebo materiálů vytvrzovaných se využívá pulzní proud. Zdroje svařovacího proudu, určené pro svařování hliníku, bývají vybaveny funkcí horkého startu. Tím se usnadní natavení materiálu při zahájení svařování. Při ukončení svaru se proud naopak postupně snižuje, aby bylo možno vyplnit koncový kráter. [3] [16]

Pro ochranu tavné lázně se při svařování hliníkových slitin metodou 131 používají inertní plyny. Výjimečně i směsi s lehce oxidačním účinkem, v tomto případě se už však bude jednat o metodu MAG 135. Argon je vhodný pro svařování materiálů o menší tloušťce, nehodí se naopak pro tupé vícevrstvé spoje. Pro tyto tlustší materiály je výhodné použít směs s héliem pro jeho výrazně vyšší tepelný výkon a výhodnější průřez svaru. Jako náhrada za drahý směsný plyn Ar-He se někdy používají směsi Ar-O₂. Oblouk hoří, v porovnání s argonem, stabilněji. Je však nutno omezit obsah kyslíku ve směsi pro jeho výrazné oxidační vlastnosti. Ten je ve většině případů 1 %, ojediněle lze použít směsi s obsahem kyslíku až 3 %.[16]

Chemické složení přídavného materiálu má být stejné jako je složení ZM z důvodu zachování jeho vlastností např. odolnosti proti korozi. U slitin náchylných na vznik horkých trhlin se může použít PM z téže materiálové skupiny s vyšším obsahem legur omezujících praskavost. Např. při svařování slitiny AlMg3 se použije drát AlMg5. [16]

Při svařování vytvrzených hliníkových slitin je třeba vzít do úvahy pokles pevnosti způsobený teplotním cyklem svařování. Je proto nutno volit takový postup a režim svařování, kterým bude materiál co nejméně tepelně ovlivněn. Vhodné je např. svařování pulzní a také strojní. To je zde výhodné zejména proto, že je při něm možno využít vyšší svařovací rychlosti a tím omezit tepelný příkon. Materiál se po svařování dále tepelně nepracovává. Je to dáno nevhodností používaných PM (AlSi5, AlMg5) pro kalení a další vytvrzování. Toto se tak docela netýká samovytvrditelných slitin po svařování, jako jsou např. AlZn4Mg1 nebo AlZn3Mg2. Svarový spoj se po svařování na vzduchu zakalí a poté dojde k jeho přirozenému vytvrzení. Pevnost pak dosahuje po dvaceti dnech hodnot 250 až 280MPa.[16]

3.3 Vysokoenergetické metody tavného svařování

Pojem vysokoenergetický je zde chápán ve smyslu působení energie o vysoké koncentraci na malý průřez. Mezi tyto metody tavného svařování se řadí svařování laserem, elektronovým paprskem a plazmou. Podle normy ČSN EN ISO 4063 patří svařování plazmou mezi obloukové metody. U svařování elektronovým paprskem a laserem se pak jedná o svařování svazkem paprsků. Jsou vhodné pro automatizaci a robotizaci. Při použití těchto metod je svařovaný materiál vystaven krátkodobému účinku

vysoké energie. Tím se dosáhne omezení difúzních pochodů, propalu prvků a také deformací. Snížením vneseného tepla do svaru dojde ke zúžení TOO, což příznivě ovlivní kvalitu svaru. Právě pro tyto vlastnosti jsou uvedené metody vhodné pro svařování vytvrditelných hliníkových slitin. [29] [3]

3.3.1 Plazmové svařování

Princip plazmového svařování je založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. Tato metoda se velmi podobá metodě TIG s tím, že do oblouku se vhání plazmový plyn. Díky zúžené výstupní plazmové trysce a fokusačnímu plynu vzniká na výstupu velmi úzký proud plazmy. Jako fokusační plyn je nutno u svařování hliníkových materiálů použít plyn inertní. Pro ochranu svarové lázně se použije rovněž inertní plyn. Svařovat je možno jak velmi tenké plechy, tak i tlustší materiál. Výhodou je vysoká rychlost svařování, a v porovnání s elektronovým nebo laserovým svařováním také podstatně nižší cena zařízení. [29] [3]

Svařovat plazmou je možné všechny druhy hliníkových materiálů. Svařuje se střídavým proudem, u materiálů s rizikem přehřátí se používá pulzní proud. [3]

3.3.2 Elektronové svařování

Tato metoda je založena na přeměně kinetické energie letících elektronů na energii tepelnou, k níž dochází po dopadu elektronů na povrch svařovaného tělesa. Teplota v místě dopadu dosahuje až 25 000 °C. Elektrony jsou emitovány katodou a pomocí magnetického pole fokusovány a směřovány do místa svařování. Celý proces musí probíhat ve vakuu. TOO svaru je velmi úzká, vnesené teplo minimální. Metoda je náročná na přesné opracování a čistotu svařovaných dílů, PM se používá výjimečně. Nutnost dosáhnout vakua využitelnost metody podstatně snižuje, má to však i své výhody. Vakuum chemicky a tepelně izoluje katodu a současně také chrání samotný svarový spoj. [29] [3]

Tuto metodu lze použít pro svařování všech hliníkových materiálů. Dokonce je možno svařovat kombinace jako jsou např. Ti – Al, Cu – Al, Al – Ni. [3]

3.3.3 Laserové svařování [29] [3]

Princip této metody spočívá v zesílení světla stimulovanou emisí záření. Excitované elektrony se vlivem vnějšího podnětu vrátí na základní energetickou hladinu a dojde k vyzaření kvanta energie podle rovnice 1.

$$E = h \cdot f \quad (3.1)$$

kde h [J·s] je Planckova konstanta
 f [s⁻¹] frekvence elektromagnetického záření

Vlastnosti laserového paprsku jsou:

- koherence (fotony mají stejný směr, frekvenci a fázový posun)
- je konvergentní (sbíhavý)
- je monochromatický (jednobarevný, vyplývá to ze stejné frekvence)

Používané lasery mohou být podle typu aktivního prostředí buď pevnolátkové nebo plynové. Plynové lasery pracují v kontinuálním nebo pulzním režimu. Emitované záření je vedeno soustavou zrcadel do technologické hlavy, v níž je paprsek fokusován na povrch svařovaného dílu. Při laserovém svařování není třeba používat PM. Svar je úzký, TOO minimální se všemi z toho plynoucími důsledky. Nároky na přesné opracování ZM jsou stejně jako u elektronového svařování vysoké.

Hliníkové materiály jsou laserem poměrně dobře svařitelné. Je však nutno počítat s vysokým stupněm odrazivosti. Ta je závislá nejen na lesku povrchu materiálu, ale i na vlnové délce dopadajícího záření (viz. tabulka 3).

Tabulka 3 – Součinitel odrazivosti hliníku

Materiál	Vlnová délka λ (μm)		
	0,7	1,06	10,6
Al	0,87	0,93	0,97

3.4 Odporové svařování [3]

Významným zástupcem tlakového svařování je svařování odporové. Vlivem průtoku elektrického proudu se materiál zahřeje a stane se plastickým. Poté dojde ke stlačení materiálu k sobě a jeho svaření. V místě styku svařovaných materiálů vniká při průchodu proudu tzv. přechodový odpor, který je zdrojem tepla. Vnesené teplo do svaru je možno stanovit na základě Joule-Lenzova vztahu.

$$Q = k \cdot R \cdot I^2 \cdot t \quad (3.2)$$

kde Q [J] je celkové množství tepla
 R [Ω] je suma všech přechodových odporů
 I [A] je elektrický proud
 t [s] je doba průchodu proudu
 k [-] koeficient vyjadřující ztráty

Při odporovém svařování se nepoužívá PM. Hlavními parametry jsou:

- svařovací proud I
- přítlačná síla P
- svařovací čas t

Hliník je nositelem některých vlastností, které mají podstatný vliv na průběh a výsledek svařování touto metodou. Jako první je třeba zmínit vysokou elektrickou vodivost, z čehož naopak vyplývá jeho malý elektrický odpor. Rovněž tepelná vodivost hliníku je ve srovnání s ocelí vysoká. Vlastností, která naopak svařování napomáhá je nízká teplota tavení hliníkových materiálů. Z výše uvedených vlastností plyne, že ke svařování hliníku je nejvhodnější tzv. tvrdý režim. Jedná se o svařování vysokým proudem s krátkým strojním časem. U bodového odporového svařování se v tomto režimu používá tlak vyšší než 5 MPa a proudové zatížení přesahující 200 A/mm². Svařovací čas je kratší než 20 period, používá se v rozsahu 0,04-0,4 s.

3.5 Speciální metody tlakového svařování

Svarový spoj vzniká silovým působením na svařované části a jejich současným přiblížením na vzdálenost působení meziatomových sil. To téměř odpovídá velikosti mřížkové konstanty. K vytvoření svarového spoje tlakovými metodami je zapotřebí určité míry plasticity spojovaných materiálů. Materiály s kubickou plošně centrovanou mřížkou, například hliník, tomuto kritériu vyhovují. [3]

3.5.1 Difúzní svařování

Hlavními parametry této metody jsou tlak, teplota a čas. Teplota má vliv na rychlost difúze, navíc zvyšuje plasticitu kovů. Výše svařovacího tlaku musí být dostatečně vysoká tak, aby došlo k potřebnému přiblížení svarových ploch v celém průřezu. Čas musí být dostatečně dlouhý pro zajištění difúzních pochodů. Volí se na základě hodnot teploty a tlaku. Difúzní svařování se většinou provádí v prostředí vakua. [3]

Tato metoda je vhodná pro svařování hliníkových materiálů. U vytvrditelných slitin hliníku však dochází vlivem působení zvýšené teploty a delšího svařovacího času k poklesu pevnostních vlastností. [3]

3.5.2 Tlakem za studena

Podstatou této metody je přiblížení povrchů svařovaných dílů téměř až na vzdálenost mřížkové konstanty. Další podmínkou je výrazná plastická deformace materiálu, pro hliník to je minimálně 60 %. Významný je rovněž poměr tvrdosti oxidů k tvrdosti kovu. Čím je tento poměr vyšší, tím se oxidy snadněji rozruší a dojde k jejich vytlačení do výronku. Pro Al_2O_3 a hliník je tento poměr 4,5, což je velmi dobré. [3]

Potřebný svařovací tlak pro Al je zhruba do 1 GPa. Ke svařování se používají hydraulické lisы, dílce jsou upnuty v přípravcích. Nedochází ke vzniku taveniny, ani tepelnému ovlivnění materiálu. Spoj má jemnozrnnou strukturu. Tato metoda je proto velmi vhodná pro svařování vytvrditelných hliníkových slitin. [3]

3.5.3 Ultrazvuk

Ke svařování se zde využívá mechanické kmitání o vysoké frekvenci. Hlavními parametry jsou: [3]

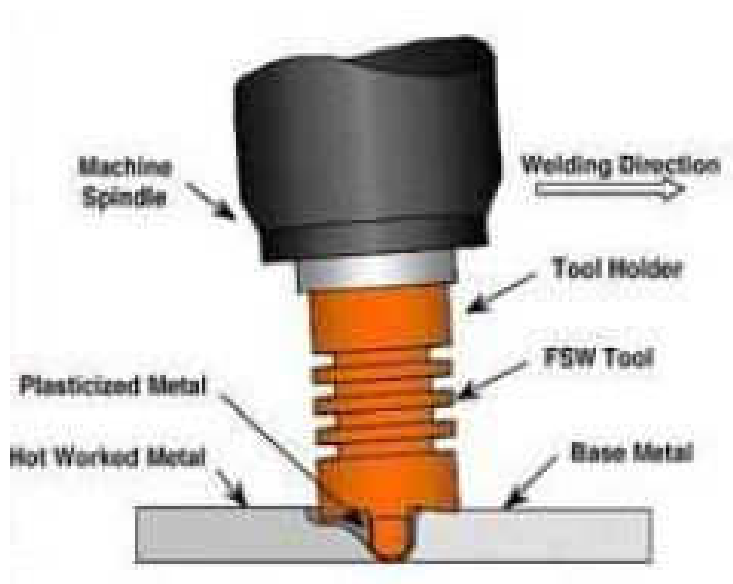
- amplituda výchylky sonotrody (optimum je 5–35 μm)
- přítlaková síla (0,4–1,2 MPa)
- frekvence ultrazvuku (10–100 Hz)
- svařovací čas (3–6 s)

Hliník a jeho slitiny (včetně vytvrditelných) jsou touto metodou dobře svařitelné nejen mezi sebou, ale i s mnoha jinými kovy. Problém nastává pouze v případě, že je rozdíl poloměrů atomů ve slitině větší než cca 18 %. Pak se ultrazvukový spoj nevytvoří. [3]

3.6 *Friction stir welding*

Tato poměrně nová svařovací metoda byla patentována roku 1991 v Cambridge, ve výrobě se používá od roku 1998. [13]

V principu se jedná o svařování třením. Teplo vzniká tím, že se rotující nástroj natlačí do ZM. Nástroj vykonává jednak rotační pohyb a dále pohyb ve směru svařování. Působením nástroje vzniká třecí teplo, čímž dojde ke vzniku zplastizované zóny v základním materiálu. Nedochází tedy k roztavení svařovaného materiálu, ale pouze k jeho změknutí následkem teploty, která dosahuje cca 80 % teploty tavení materiálu. Tlak, kterým působí nástroj na zplastizovaný materiál ho přesouvá dozadu za nástroj, kde materiál chladne a tuhne. [13] [11]



Obrázek 15 – Princip svařování metodou FSW

Metoda FSW je pro svařování hliníku a jeho slitin, dokonce i těch obtížně svařitelných tavnými metodami, velmi vhodná. Mezi hlavní výhody této metody patří neexistence tavné lázně, z toho plynoucí významné omezení deformací a šířky TOO. Svary mají oproti svařování tavnými metodami vyšší pevnost, odolnost proti únavě a korozi. Svařuje se bez ochranných plynů a PM. Technologie je šetrná k životnímu prostředí a zdraví obsluhy. [13] [11]

3.7 Návrh vhodných metod svařování

Z výše uvedeného přehledu jsou zřejmé technologické přednosti, či naopak jistá omezení týkající se svařitelnosti vytvrditelných hliníkových slitin jednotlivými metodami.

V praxi se pro svařování hliníkových materiálů nejvíce používají metody TIG 141 a MIG 131. Z tohoto důvodu byly vybrány pro posouzení jejich vlivu na vlastnosti svarového spoje slitiny EN AW 6082.

4 Ověřování vlastností svarových spojů

Pro ověření výsledných vlastností svarových spojů je třeba provést jejich zkoušky. Ty se dělí do dvou základních skupin, na destruktivní a nedestruktivní.

Destruktivní zkoušky:

- Zkoušky tvrdosti
- Zkoušky mikrotvrdosti
- Příčná zkouška tahem
- Podélná zkouška tahem
- Zkouška rázem v ohybu
- Zkouška lámavosti
- Zkouška rozlomením
- Kontrola makrostruktury
- Kontrola mikrostruktury

Nedestruktivní zkoušky:

- Vizuální kontrola
- Radiografická kontrola
- Kapilární zkouška
- Ultrazvuková zkouška
- Zkouška magnetická prášková
- Zkoušky těsnosti (např. potrubí)

Cílem zkoušení zhotovených svarů dvěma vybranými metodami je zjištění jejich vlastností po aplikaci svařování. Svary budou podrobeny následujícím zkouškám.

- Vizuální kontrola
- Kapilární zkouška
- Radiografická kontrola
- Příčná zkouška tahem
- Kontrola makrostruktury

5 Experimentální část

V této části práce bude ověřován teoretický předpoklad snížení pevnostních vlastností vytvrditelných hliníkových slitin v důsledku svařování. Materiál, na kterém budou provedeny příslušné zkoušky, má dle ČSN EN 573-1 označení EN AW 6082.

5.1 Základní materiál a jeho charakteristika

Zvolený základní materiál je vytvrditelná hliníková slitina EN AW 6082 (AlSi1MgMn). Svařitelnost materiálu je dobrá, je vhodný pro eloxování, má dobrou obrobitelnost a odolnost proti korozi. Tato slitina se využívá např. ve výrobě lodí, letadel a kolejových vozidel. Hlavními legujícími prvky jsou hořčík a křemík. Chemické složení je uvedeno v tabulce 5, mechanické vlastnosti pak v tabulce 4. V tabulkách jsou vždy uvedeny obvyklé charakteristiky slitiny EN AW 6082. Hned pod nimi jsou pak hodnoty téhož materiálu konkrétní tavby, který byl použit pro výrobu zkušebních dílců. Opis hutního atestu je v příloze 1. Uvedené hodnoty mechanických vlastností platí pro pokojovou teplotu.

Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082.T6

	Tvrdość podle Brinella	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]
Obecné charakteristiky	95	295	240	8
Tavba č. 01/0045134/1	-	331 - 336	281 - 286	16 - 17

Tabulka 5 – Chemické složení slitiny EN AW 6082.T6

	Značka prvku	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Chemické složení podle EN 573-3	Obsah v hm. [%]	0,7 - 1,3	max. 0,50	max. 0,10	0,4 - 1,0	0,6 - 1,2	max. 0,25	max. 0,20	max. 0,10
Tavba č. 01/0045134/1	Obsah v hm. [%]	0,9	0,45	0,07	0,5	0,8	0,04	0,04	0,03

Doplňková značka za tečkou v označení slitiny EN AW 6082.T6 označuje stav tepelného zpracování. Značka T6 udává, že dodaný materiál je ve stavu po rozpouštěcím žhání a po umělém stárnutí.

5.2 Přídavný materiál a jeho charakteristika

Ke svařování byl použit přídavný materiál od firmy ESAB. Pro svařování metodou TIG byl s ohledem na použitý základní materiál zvolen drát OK TIGROD 5087 (AlMg4,5MnZr). Tento materiál se používá pro svařování slitin hliníku s maximálním obsahem hořčíku 5 % a při požadavku vyšší pevnosti. Legování zirkonem zlepšuje odolnost proti horkým trhlinám. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 6, chemické složení v tabulce 7.

Tabulka 6 – Typické mechanické vlastnosti čistého svarového kovu

KV při 20 °C [J]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]
35	280	130	30

Tabulka 7 – Typické chemické složení čistého svarového kovu

Značka prvku	Al	Zr	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Obsah v hm. [%]	zbytek	0,15	< 0,25	< 0,40	< 0,05	0,9	4,9	0,15	< 0,25	< 0,15

Další údaje:

- svařovací proud AC
- ochranný plyn dle ČSN EN ISO 14 175 II, I3

Pro svařování metodou MIG byl použit drát OK AUTROD 5087 (AlMg4,5MnZr). Přídavný materiál je svým chemickým složením a mechanickými vlastnostmi totožný s materiálem použitým u metody TIG. Tyto hodnoty jsou tedy již uvedeny v tabulce 1 a tabulce 2.

Další údaje:

- | | |
|---------------------------------------|--------|
| • svařovací proud | DC (+) |
| • ochranný plyn dle ČSN EN ISO 14 175 | II, I3 |

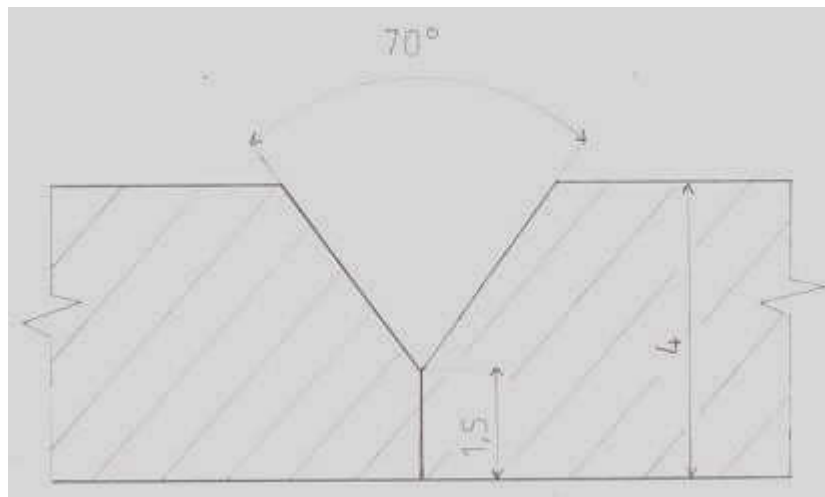
5.3 Svařování slitiny EN AW 6082

Vlastní svařování proběhlo 20.3.2012 a celkem byly svařeny čtyři zkušební dílce, dva metodou TIG 141 a dva metodou MIG 131. U obou metod bylo použito ručního svařování.

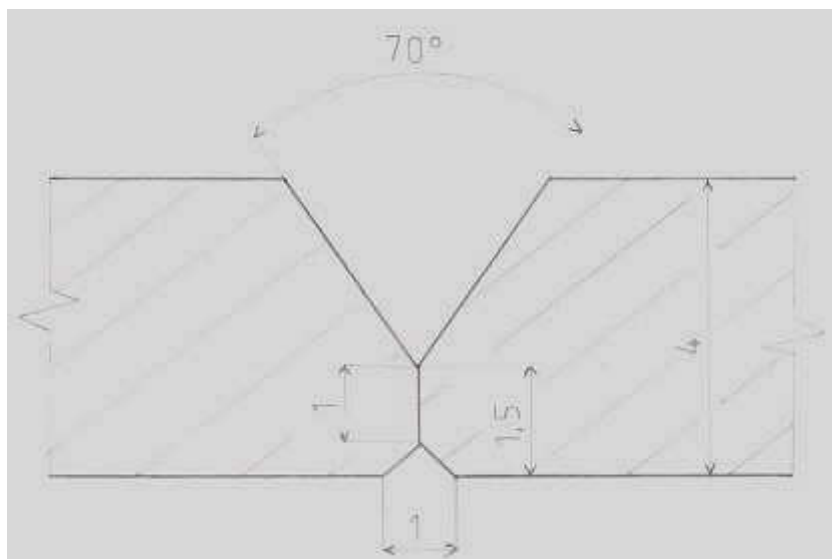
5.3.1 Příprava svařovaných dílců

Pro svařování byl použit základní materiál o tloušťce $t = 4$ mm. Rozměry svařovaných dílců byly 300×125 mm. Úprava svarových ploch je vyznačena na obrázku 16 pro svařování MIG a na obrázku 17 pro svařování TIG. Příprava dílců byla provedena mechanicky:

- řezáním
- frézováním



Obrázek 16 – Úprava svarových ploch – svařování MIG



Obrázek 17 – Úprava svarových ploch – svařování TIG

svarová mezer	$b = 0 \text{ mm}$
otupení	$c = 1,5 \text{ mm}$
sražení spodní hrany	$a = 0,5 \text{ mm}$
úhel otevření	$\alpha = 70^\circ$

Sražení spodní hrany se týká pouze svařování metodou TIG, u metody MIG nebylo provedeno. Spodní hrana se upravuje z důvodu lepšího formování kořene svaru.

Čištění povrchu svařovaného materiálu bylo provedeno rovněž mechanicky. Oxidická vrstva byla očištěna ocelovým kartáčem až do šířky 20 mm od budoucího svaru. Svarové plochy byly dále důkladně odmaštěny. Svařování každého vzorku bylo zahájeno vždy nejpozději do třiceti minut od jeho čištění. Z důvodu zamezení deformacím a zajištění správné polohy svařovaných dílů byl použit upínací přípravek.



Obrázek 18 – Upnuté díly před svařováním

5.3.2 Svařování TIG

V následující tabulce jsou uvedeny základní údaje o svařování a hodnoty svařovacích parametrů. Tupý V-svar byl zavařen na dvě vrstvy. Doporučené parametry pro svařování tupého V-svaru se všemi detaily jsou uvedeny ve WPS v příloze 3. Zde jsou konkrétní hodnoty zaznamenané přímo v průběhu svařování.

Tabulka 8 – Parametry svařování

Svařovací parametry – svařování TIG 141	
Svařovací proud [A]	190 – 195
Svařovací napětí [V]	14,6
Rychlost svařování [cm/min]	15
Průměr přídatného drátu	Ø 1,6 mm – kořenová housenka
	Ø 2,4 mm – krycí housenka
Průměr wolframové elektrody	Ø 2,4 mm
Poloha svařování	PA

Přehřev	Bez přehřevu
Druh wolframové elektrody	WC 20
Ochranný plyn	Argon – Ar 4.8 (výrobce Messer)
Průtok ochranného plynu [l/min]	13

Použitý ochranný plyn Ar 4.8 má čistou 99,998 %. Ke svařování byl použit zdroj svařovacího proudu FRONIUS MAGIC WAVE 2200 JOB. Svařovalo se v pulzním režimu.

5.3.3 Svařování MIG

V následující tabulce jsou uvedeny základní údaje o svařování a hodnoty svařovacích parametrů. Tupý V-svar byl zavařen na jednu vrstvu. Doporučené parametry pro svařování tupého V-svaru se všemi detaily jsou uvedeny v příloze 4. Zde jsou opět konkrétní hodnoty zaznamenané přímo v průběhu svařování.

Tabulka 9 – Parametry svařování

Svařovací parametry – svařování MIG 131	
Svařovací proud [A]	140
Svařovací napětí [V]	19,7
Rychlost svařování [cm/min]	50
Průměr přídavného drátu	Ø 1,2 mm
Poloha svařování	PA
Přehřev	Bez přehřevu
Ochranný plyn	Argon – Ar 4.8 (výrobce Messer)
Průtok ochranného plynu [l/min]	15

K ochraně svarové lázně při svařování metodou MIG byl využit stejný ochranný plyn jako u metody TIG. Zdroj svařovacího proudu FRONIUS TRANSPULS SYNERGIC 4000 byl při svařování nastaven v pulzním režimu.

5.3.4 Teplo vnesené do svaru

Vnesené teplo do svaru se vypočte z následujícího vztahu. [1]

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \quad (5.1)$$

kde	$Q \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-2}]$	je množství vneseného do svaru
	$k [-]$	je koeficient tepelné účinnosti metody svařování
	$U \text{ [V]}$	je svařovací napětí
	$I \text{ [A]}$	je svařovací proud
	$v \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-1}]$	je rychlost svařování

TIG svařování

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} = 0,6 \cdot \frac{14,6 \cdot 195}{150} \cong 11,4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$$

MIG svařování

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} = 0,8 \cdot \frac{19,7 \cdot 140}{500} \cong 4,4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Množství tepla vneseného do svaru bylo při svařování metodou TIG podstatně vyšší, než při svařování metodou MIG.

6 Zkoušky svarových spojů a dosažené výsledky

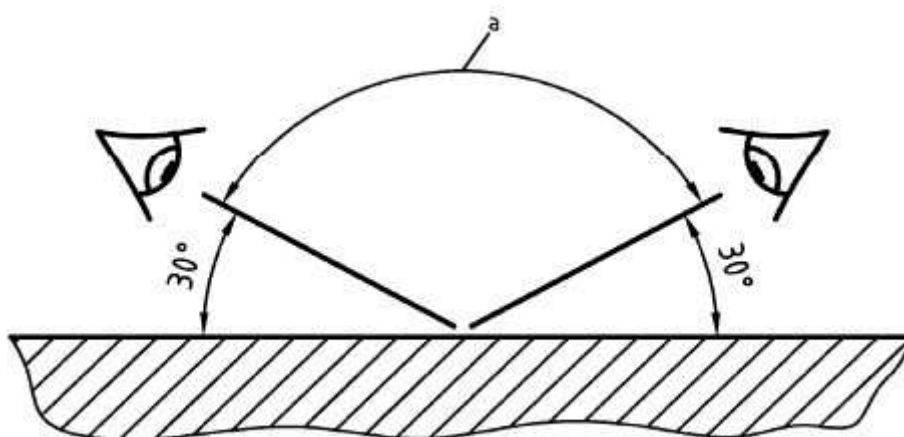
Pro ověření vlastností svarových spojů a posouzení vlivu svařování zvolenými metodami na hliníkovou slitinu EN AW 6082 je třeba provést vybrané zkoušky. Jelikož při tavném svařování vytvrditelných hliníkových slitin existuje reálný předpoklad snížení pevnostních charakteristik, je pro posouzení tohoto předpokladu klíčová tahová zkouška. Zkoušky vizuální, kapilární a radiografická jsou nutným doplňkem, umožňujícím zjistit případné vady ve svaru. Tyto vady by totiž mohly negativně ovlivnit výsledek tahové zkoušky, čímž by došlo ke zkreslení výsledků. Kontrola makrostruktury pak má za cíl především zjistit šířku TOO a posoudit vliv jednotlivých metod svařování na strukturu.

6.1 Vizuální kontrola svarů (VT)

Vizuální kontrola byla provedena u všech čtyř vzorků v rozsahu 100 %. Kontrola byla uskutečněna v souladu s normou ČSN EN ISO 17637. Společně s touto normou byly k hodnocení použity další normy:

- ČSN EN ISO 10042 – pro určení stupňů kvality (zvolen stupeň kvality B)
- ČSN EN ISO 6520-1 – klasifikace vad pro tavné svařování

Pro posouzení kvality svarového spoje byla použita přímá vizuální kontrola. Pro provedení této kontroly je nezbytné osvětlení povrchu svaru nejméně 350 lx, doporučuje se však 500 lx. Vzdálenost oka od kontrolovaného předmětu nesmí být větší než 600 mm a současně nesmí být úhel pozorování menší než 30°.



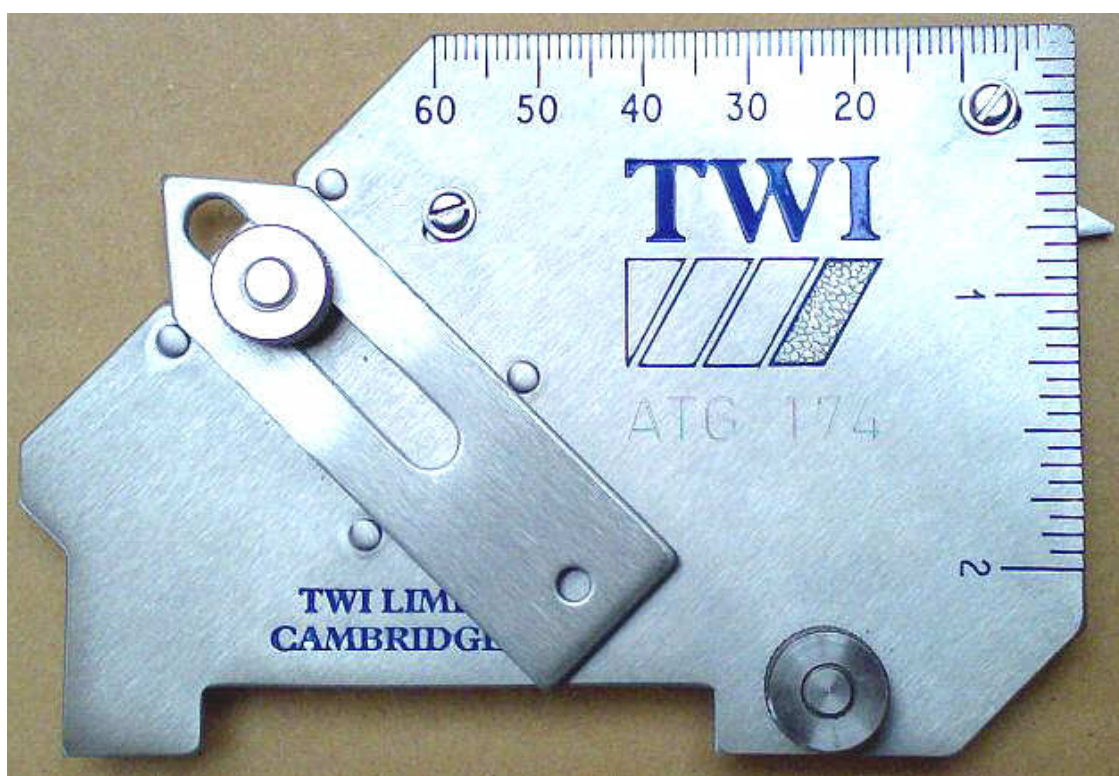
Obrázek 19 – Přímá vizuální kontrola. Značka a znázorňuje povolený rozsah úhlu pozorování. [34]

Při kontrole svarů byly použity následující pomůcky:

- lupa zvětšení 5×
- jednoduchá měrka svaru
- víceúčelová měrka (Cambridge – Type)



Obrázek 20 – Jednoduchá měrka [34]



Obrázek 21 – Víceúčelová měrka

Výsledky vizuální kontroly provedené na jednotlivých vzorcích jsou uvedeny v následující tabulce. Číslo vady odpovídá normě ČSN EN ISO 6520-1, její umístění je počítáno od místa počátku svařování. Přesné údaje je možno nalézt v protokolech, jedná se o přílohy 5 až 8.

Tabulka 10 – VT – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Hodnocení	Název vady	Číslo vady	Umístění [mm]
TIG 1	vyhovuje	-	-	-
TIG 2	vyhovuje	-	-	-
MIG 1	vyhovuje	-	-	-
MIG 2	nevyhovuje	nadměrné převýšení tupého svaru	502	53
		nadměrné převýšení kořene	504	148

6.2 Kapilární zkouška (PT)

Pomocí kapilární zkoušky lze s poměrně velkou citlivostí odhalit povrchové vady nebo vady související s povrchem. Při provádění této zkoušky je zapotřebí nejprve důkladně očistit povrch. V další fázi se na očištěný povrch nanese penetrant (byl použit Pfinder 860) a nechá se působit po předem stanovenou dobu. Poté se přebytky penetrantu na povrchu odstraní omytím a povrch se osuší. Následuje poslední fáze, kdy se nanesením vývojky (Pfinder 870) vyvolají indikace. Tyto se hodnotí vizuálně.

Kapilární (penetrační) zkouška byla provedena u vzorků vybraných pro příčnou zkoušku tahem. Jeden vzorek byl svařován metodou TIG, druhý metodou MIG. Kontrola se u obou vybraných vzorků prováděla v rozsahu 100 %. Kontrola byla uskutečněna v souladu s normou ČSN EN 571-1. Svary byly vyhodnoceny podle normy ČSN EN ISO 10042, zvolený stupeň jakosti B. Byla použita metoda barevné indikace.

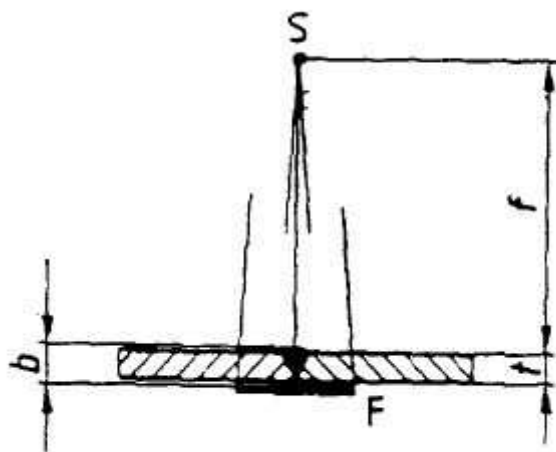
Výsledky zkoušek provedených na vybraných vzorcích jsou uvedeny v následující tabulce. Číslo vady odpovídá normě ČSN EN ISO 6520-1, její umístění je počítáno od místa počátku svařování. Přesné údaje o penetračních zkouškách lze nalézt v přílohách 9 a 10.

Tabulka 11 – PT – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Hodnocení	Název vady	Číslo vady	Umístění [mm]
TIG 1	nevyhovuje	řádka pórů	2014	22-30
		povrchový pór	2017	165
		řádka pórů	2014	198 – 204
MIG 1	nevyhovuje	řádka pórů	2014	0 – 10
		studený spoj	401	56 – 58
		povrchové póry	2017	180 - 195

6.3 Radiografická kontrola (RT)

Jedná se o metodu radiologickou (prozařovací). Princip spočívá v průchodu záření o velmi vysoké energii, nejčastěji RTG paprsků, kontrolovaným materiálem. V místech vad dochází ke změně intenzity prošlého záření. Tyto vady se indikují na detektoru. Při použití radiografické metody se jako detektor používá fotografický film, vady se zde projeví jako světlejší nebo naopak tmavší místa na radiogramu.

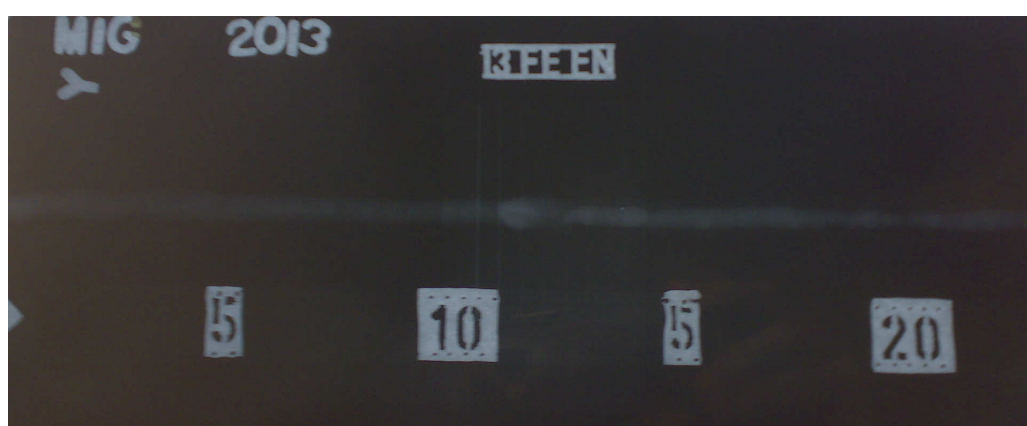


Obrázek 22 – Princip radiografické kontroly, S – zdroj záření, F – film, b – vzdálenost objekt-film, t – jmenovitá tloušťka, f – vzdálenost zdroj-objekt

Radiografická kontrola byla provedena u vzorků TIG 1 a MIG 1 vybraných pro příčnou zkoušku tahem. Kontrola se u obou vzorků prováděla v rozsahu 100 % v souladu s normou ČSN EN 1435. Kvalita snímku se ověřovala použitím drátkových měrek. Svary byly vyhodnoceny podle normy ČSN EN ISO 10042, zvolený stupeň jakosti B.



Obrázek 23 – Radiogram vzorku TIG 1



Obrázek 24 – Radiogram vzorku MIG 1

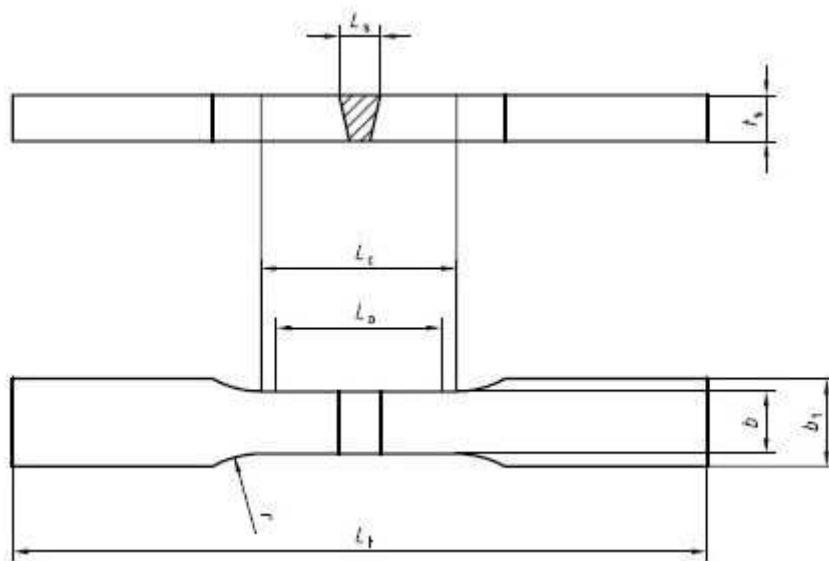
Výsledky zkoušek provedených na vybraných vzorcích jsou uvedeny v následující tabulce. Číslo vady odpovídá normě ČSN EN ISO 6520-1, její umístění je počítáno od místa počátku svařování. Přesné údaje lze nalézt v přílohách 11 a 12.

Tabulka 12 – RT – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Hodnocení	Název vady	Číslo vady	Umístění [mm]
TIG 1	nevyhovuje	řádka pórů	2014	20 – 36
		shluk pórů	2013	160
		pór	201	180
		řádka pórů	2014	198 – 204
MIG 1	nevyhovuje	řádka pórů	2014	0 – 10
		studený spoj	401	56 – 58
		studený spoj	401	110 – 125
		povrchové póry	2017	180 - 195

6.4 Příčná zkouška tahem

Tato zkouška je klíčová pro zjištění pevnostních charakteristik materiálu. Příčná zkouška tahem se provádí a vyhodnocuje podle norem ČSN EN ISO 4136 a ČSN EN ISO 6892-1. Pro její uskutečnění bylo ze zkušebních dílců TIG 1 a MIG 1 odebráno po dvou vzorcích. Přesné rozměry a způsob odběru vzorků jsou popsány v normě. Odběr vzorků a příprava zkušebních tyčí musí proběhnout tak, aby nedošlo k ovlivnění jejich vlastností.

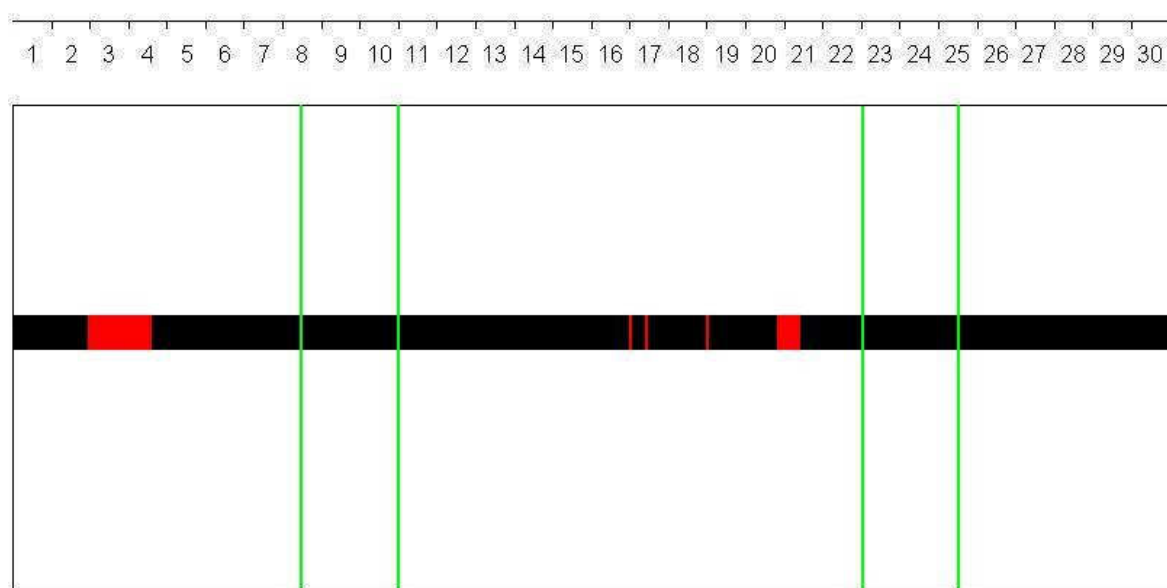


Obrázek 25 – Tvar zkušební tyče pro plechy

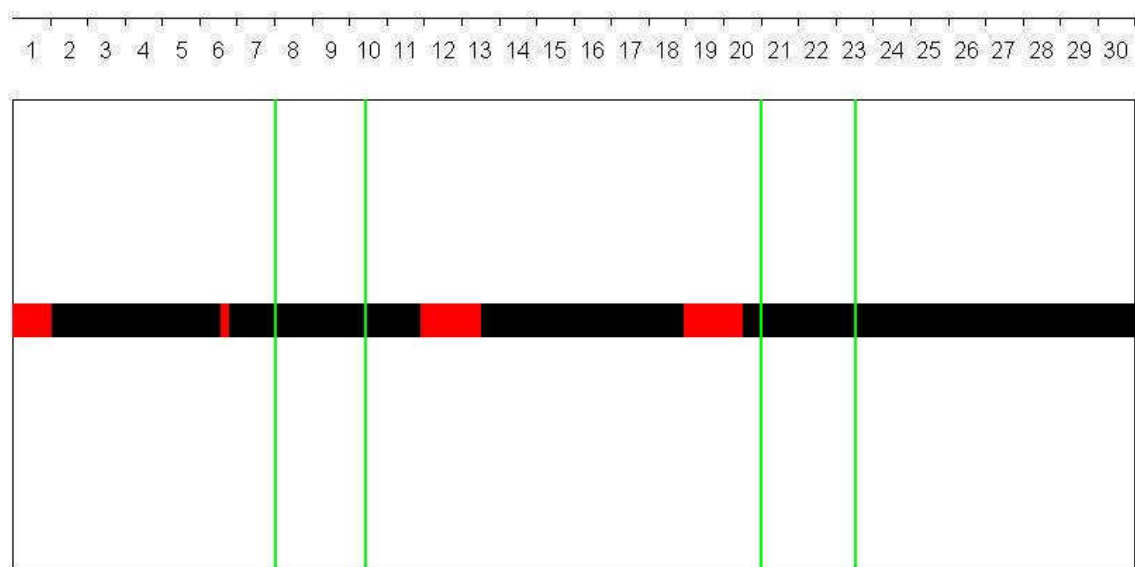
Značka	Termín	Jednotka
b	Šířka rovnoběžné délky	mm
b_1	Šířka hlavy upínacího konce	mm
d	Průměr upevňovacího trnu	mm
D	Vnější průměr trubky ^a	mm
L_c	Rovnoběžná délka	mm
L_o	Počáteční měřená délka	mm
L_s	Maximální šířka svaru po opracování	mm
L_t	Celková délka zkušební tyče	mm
r	Poloměr zaoblení u hlavy	mm
t	Tloušťka svarového spoje	mm
t_s	Tloušťka zkušební tyče	mm
^a Termín „trubka“, samotný nebo v kombinaci, znamená „trubku“, „potrubí“ nebo „dutý profil (bez pravoúhlého průřezu)“.		

Obrázek 26 – Vysvětlení použitých symbolů pro zkušební tyč

Jelikož byly na svařencích zjištěny vady, které by mohly ovlivnit výsledky tahové zkoušky, bylo nutno jejich umístění označit a vzorky odebrat z míst bez vad. Na obrázcích 27 a 28 jsou vyznačeny místa odběru vzorků pro výrobu zkušebních tyčí ze svařenců.



Obrázek 27 – Prostor uvnitř zelených čar vyznačuje místa odběru vzorků TIG 1.1 a TIG 1.2. Černý pruh znázorňuje svar, červeně jsou vyznačeny případné vady.



Obrázek 28 – Prostor uvnitř zelených čar vyznačuje místa odběru vzorků MIG 1.1 a MIG 1.2. Černý pruh znázorňuje svar, červeně jsou vyznačeny případné vady.

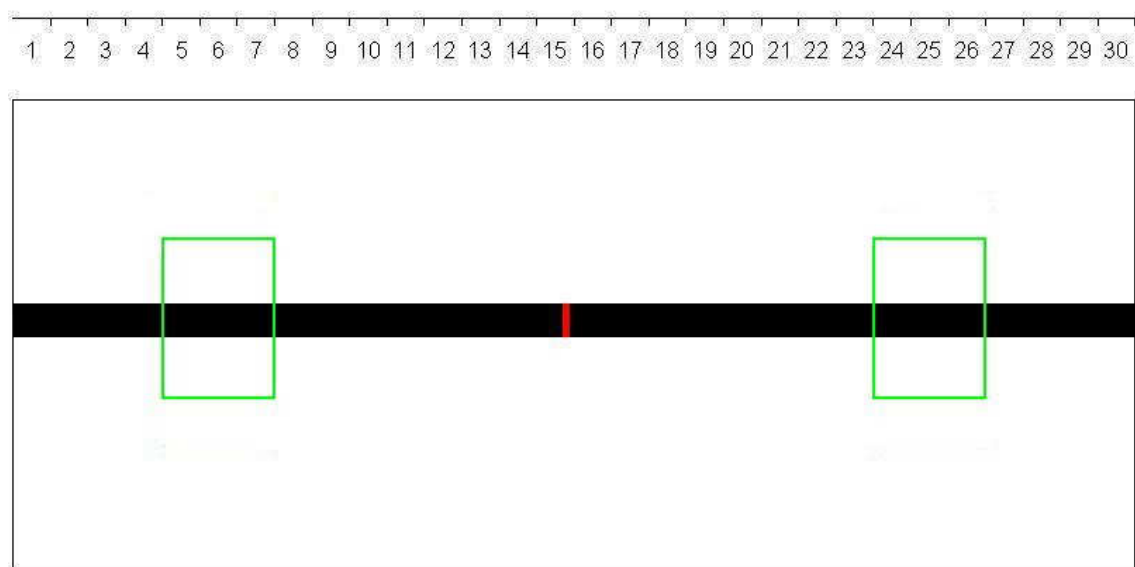
Tabulka 13 – Příčná zkouška tahem – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Mez pevnosti [MPa]	Místo porušení	Maximální síla [kN]
TIG 1.1	85	TOO	6,8
TIG 1.2	88	TOO	7,0
MIG 1.1	84	TOO	6,7
MIG 1.2	84	TOO	6,7

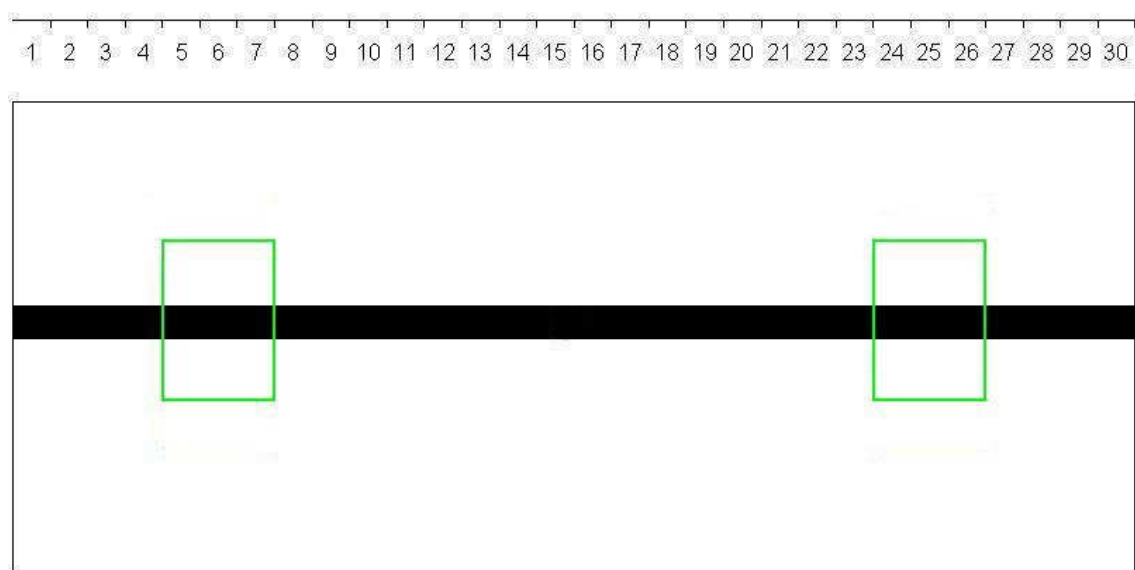
Průřez zkušebního vzorku měl rozměry 20 × 4 mm, teplota zkoušení byla 20 °C.

6.5 Kontrola makrostruktury

Tato destruktivní zkouška slouží k posouzení stavu struktury materiálu. Pro uskutečnění makrostrukturní zkoušky byly ze zkušebních dílců TIG 2 a MIG 2 odebrány celkem čtyři vzorky. Rozměry vzorků o velikosti 45 × 30mm se odebíraly příčně k ose svaru, nařezáním pásovou pilou Bomar. Odebrané vzorky musí obsahovat svarový kov, obě TOO a také základní materiál. Vzorky byly, z důvodu rizika smytí označovače leptadlem, označeny vrypky jehlou.



Obrázek 29 – Zelený obdélník vyznačuje místa odběru vzorků MIG 2.1 a MIG 2.2. Černý pruh znázorňuje svar, červeně jsou vyznačeny případné vady.



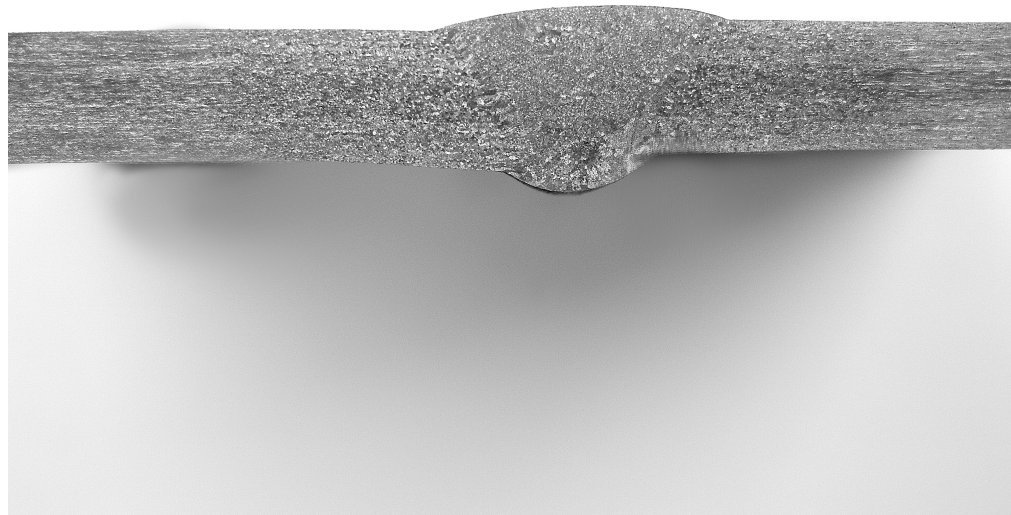
Obrázek 30 – Zelený obdélník vyznačuje místa odběru vzorků MIG 2.1 a MIG 2.2. Černý pruh znázorňuje svar, červeně jsou vyznačeny případné vady.

Samotná zkouška makrostruktury byla provedena dle normy ČSN EN 1321. Byla uskutečněna metalografická příprava – makroskopická, použita metoda kolmého řezu bez zalévání.

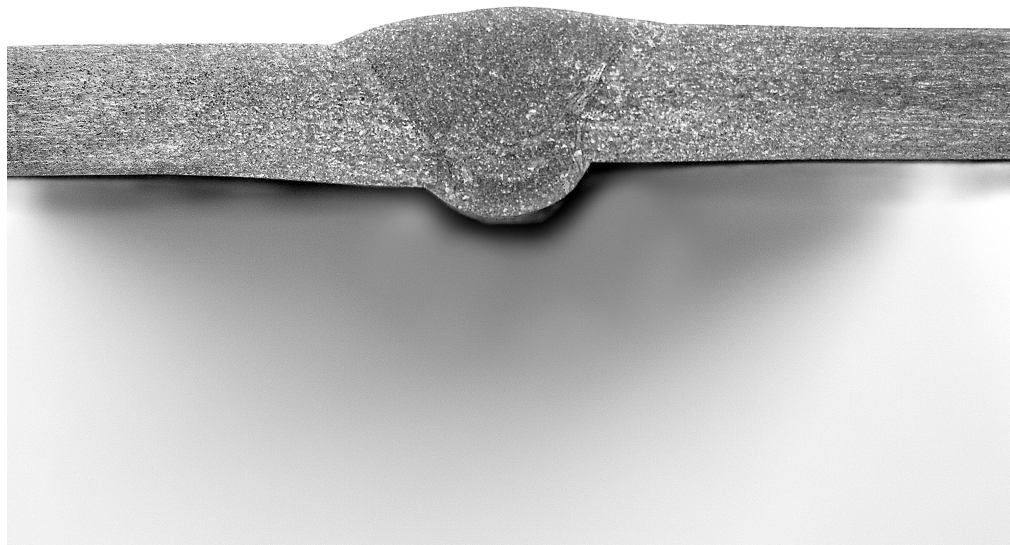
Dalším krokem při přípravě vzorků bylo jejich broušení a leštění, které se provádělo za mokra na zařízení firmy Struers. Zrnitost použitého brusného papíru byla 500. Jelikož je zkoušená hliníková slitina poměrně měkká, mohlo být broušení uskutečněno přímo

na brusném papíru finální zrnitosti. Nemuselo tedy proběhnout žádné předbrušování. Po broušení následoval oplach vodou a vysušení vzorků.

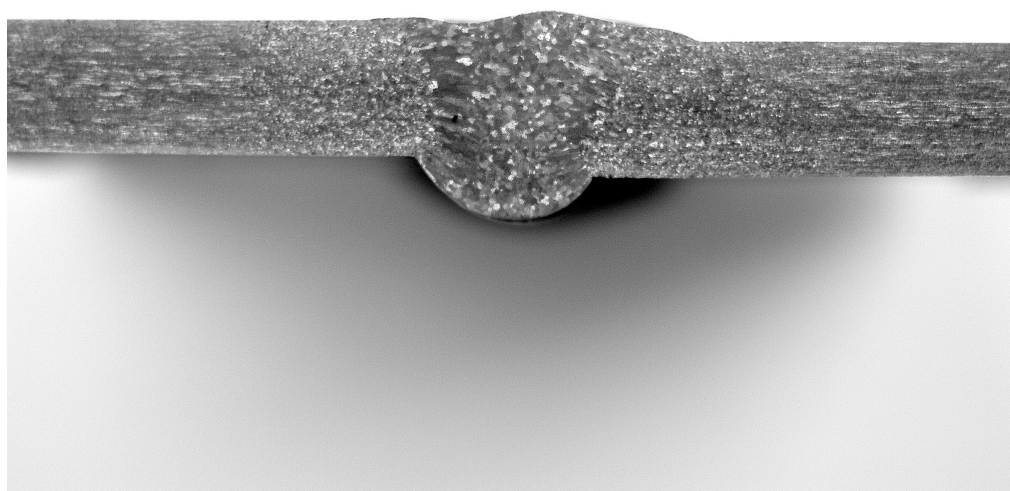
Pro naleptání vzorků se použilo leptadlo Adler. Povrch vyleštěných vzorků byl tímto leptadlem potírán po dobu nutnou k vyvolání makrostruktury. Poté následoval oplach vodou a sušení. Posledním krokem bylo pořízení fotografií digitálním fotoaparátem Olympus C – 7070. Fotografie makrostruktury jednotlivých vzorků jsou na následujících obrázcích. Fotografovalo se bez zvětšení, to bylo provedeno až dodatečně s využitím počítačové podpory v měřítku 5:1.



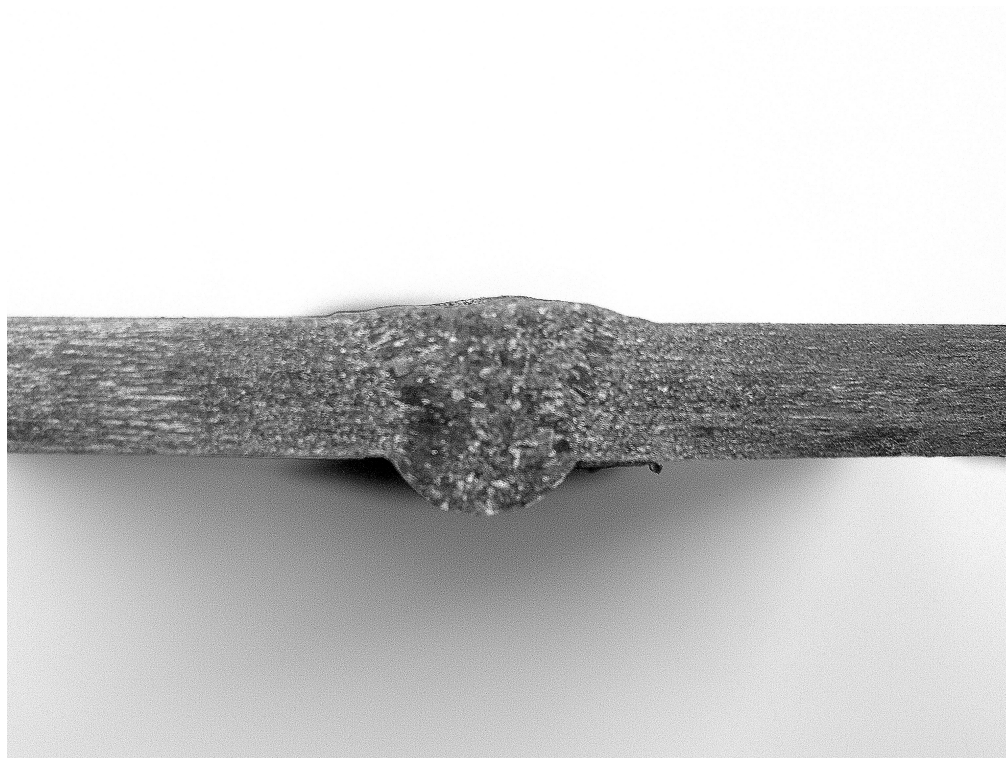
Obrázek 31 – Makrostruktura svarového spoje, vzorek TIG 2.1



Obrázek 32 – Makrostruktura svarového spoje, vzorek TIG 2.2



Obrázek 33 – Makrostruktura svarového spoje, vzorek MIG 2.1



Obrázek 34 – Makrostruktura svarového spoje, vzorek MIG 2.2

Svarová spojení všech vzorků jsou bez viditelných vad, například trhlin, pórů, neprůvarů apod. To dokladuje vhodnost zvolených technologií pro svařování hliníkové slitiny EN AW 6082 a rovněž správnost použitých parametrů.

Tabulka 14 – Zkouška makrostruktury – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Hodnocení	Struktura SK	Šířka TOO [mm]
TIG 2.1	bez vad	jemnozrnná	7,1
TIG 2.2	bez vad	jemnozrnná	6,7
MIG 2.1	bez vad	hrubozrnná	5,0
MIG 2.2	bez vad	hrubozrnná	5,2

6.6 Zhodnocení dosažených výsledků

V této podkapitole jsou stručně shrnuty výsledky všech nedestruktivních a destruktivních zkoušek, kterým byly svařené zkušební dílce ze slitiny EN AW 6082.T6 podrobeny. Podrobnější rozbor a postup při jejich provádění je uveden v předcházejících podkapitolách. Byly svařeny celkem čtyři zkušební dílce, dva metodou TIG a dva metodou MIG. Přehled zkušebních dílců a z nich zhotovených vzorků pro destruktivní zkoušení, včetně výsledků je uveden v tabulce.

Tabulka 15 – Přehled provedených zkoušek (kromě tahové)

Dílec	Vzorek	Název zkoušky			
		VT	PT	RT	Makrostruktura
TIG 1		vyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje	
	TIG 1.1				-
	TIG 1.2				-
MIG 1		vyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje	
	MIG 1.1				-
	MIG 1.2				-
TIG 2		vyhovuje	-	-	
	TIG 2.1				vyhovuje
	TIG 2.2				vyhovuje
MIG 2		nevyhovuje	-	-	
	MIG 2.1				vyhovuje
	MIG 2.2				vyhovuje

Některé ze zkušebních dílců, vzhledem k výskytu nepřípustných vad pro zvolený stupeň jakosti, nevyhověly požadavkům norem. Vady byly použitými NDT metodami přesně lokalizovány. Vzorky pro tahovou zkoušku tak mohly být odebrány z míst bez výskytu vad.

Hodnoty meze pevnosti zjištěné tahovou zkouškou odpovídaly předpokladům. Došlo k výraznému poklesu meze pevnosti u všech vzorků. O něco větší mez pevnosti vykázaly vzorky svařované metodou TIG. Jedná se však o rozdíl minimální, neumožňující vyslovení jednoznačného závěru ve prospěch svařování touto metodou. U všech vzorků došlo k porušení materiálu v TOO. Pro srovnání je zde uveden výsledek tahové zkoušky prováděné firmou BZS Rail na vzorcích svařovaných metodou MIG. Rovněž zde došlo k výraznému poklesu meze pevnosti a porušení materiálu mimo svar. Tímto byl potvrzen předpoklad poklesu pevnosti u vytvrzené slitiny EN AW 6082.

Při zahřátí nad 200 °C začne pevnost postupně klesat, až při teplotě nad 400 °C poklesne na hodnoty vyžíhaného materiálu. K největšímu poklesu dochází v TOO v pásmu přehřátí. Příčinou poklesu pevnosti svarového spoje je postupné rozpouštění precipitátu. Rychlost a rozsah tohoto rozpouštění je ovlivněn teplotou a dobou setrvání na této teplotě.

Tabulka 16 – Porovnání výsledků tahové zkoušky

Autor		BZS Rail	Vícha
ZM		EN AW 6082	EN AW 6082
PM		OK Autrod 5087	OK Autrod 5087
Autor	Vzorek	Rm [MPa]	Místo porušení
BZS Rail (vše MIG)	T1	75	Mimo svar
	T2	71	Mimo svar
Vícha (MIG + TIG)	TIG 1.1	85	TOO
	TIG 1.2	88	TOO
	MIG 1.1	84	TOO
	MIG 1.2	84	TOO

Zkoušky makrostruktury byly provedeny na celkem čtyřech vzorcích. Dva byly odebrány ze zkušebního kusu svařeného metodou TIG a dva z kusu zhotoveného metodou MIG. Svarová spojení všech vzorků byla bez viditelných vad. Nebyly zjištěny žádné trhliny, póry, neprůvary či jiné vady. Zvolené technologie a parametry svařování je proto možno vyhodnotit jako správné. Vzorky svažené metodou TIG vykazovaly širší TOO, struktura SK a TOO byla jemnější oproti vzorkům, kde byla aplikována metoda MIG.

Závěr

Tato bakalářská práce byla věnována svařování vytvrditelné hliníkové slitiny EN AW 6082. Jejím cílem bylo zhodnocení vlivu svařování metodami TIG 141 a MIG 131 na výsledné vlastnosti této slitiny. Jelikož se jedná o slitinu široce využívanou, má hodnocení vlivu svařování jednotlivými metodami na její vlastnosti značný význam.

V první kapitole byl proveden teoretický rozbor vlastností hliníku a jeho slitin, jejich rozdělení a značení dle platných norem. Část této kapitoly byla věnována tepelnému zpracování těchto materiálů. Další kapitola byla zaměřena na svařitelnost hliníku a jeho slitin. Byly zde nastíněny hlavní problémy vznikající při svařování, jako je např. pórovitost, pokles pevnosti vytvrzených slitin, přítomnost oxidu hlinitého nebo náchylnost na vznik trhlin. V následujících kapitolách teoretické části byl podán přehled hlavních metod používaných pro svařování hliníku a jeho slitin. Byly zvoleny dvě metody pro praktické ověření jejich vlivu na svařovaný materiál. Pro posouzení tohoto vlivu byly vybrány vhodné nedestruktivní a destruktivní metody zkoušení.

V úvodu praktické části byl proveden rozbor svařované hliníkové slitiny EN AW 6082, jak z hlediska chemického složení, tak i jejích mechanických vlastností. Jelikož se jednalo o slitinu ve vytvrzeném stavu, byl zde předpoklad poklesu pevnosti po aplikaci výše uvedených metod svařování. Tento předpoklad zcela potvrdily výsledky tahových zkoušek. Všechny vzorky svařované zvolenými metodami TIG a MIG vykazovaly výrazný pokles meze pevnosti. Vzorky odebrané pro kontrolu makrostruktury nevykazovaly žádné viditelné vady.

Závěrem je možno zhodnotit použité metody pro svařování slitiny EN AW 6082 při zvolených parametrech jako vhodné. Avšak při požadavku na výrazné omezení poklesu meze pevnosti této slitiny svařováním není použití metod TIG a MIG již tak výhodné.

Použitá literatura

- [1] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T., *Svařování I.* skriptu VŠB-TU Ostrava, 2005, 136 s., ISBN 80-248-0870-6
- [2] KOLEKTIV AUTORŮ, *Materiály a jejich svařitelnost.* Ostrava, 2001, ZEROSS, 292 s., ISBN 80-85771-85-3
- [3] KOLEKTIV AUTORŮ, *Technologie svařování a zařízení.* Ostrava, 2001, ZEROSS, 395 s., ISBN 80-85771-81-0
- [4] ORSÁGH, V., ORSÁGH, P., *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov.* Bratislava, 1998, Polygrafia SAV, 300 s., ISBN 80-88780-21-7
- [5] TURŇA, M., *Špeciálne metódy zvárania.* Bratislava, 1989, ALFA, 383 s., ISBN 80-05-00097-9
- [6] MALINA, Z., NÉMA, M., *Základní kurz svařování ZK 141 W 21.* Ostrava, 2004, ZEROSS, 93 s., ISBN 80-86698-02-5
- [7] WIKIPEDIE, *Hliník.* [online]. [cit. 2012-03-08], Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>>
- [8] Periodická tabulka, *Hliník.* [online]. [cit. 2012-03-08], Dostupné z: <<http://www.prvky.com/13.html>>
- [9] ČSN EN 573-1, *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 1: Číselné označování.* Praha: Český normalizační institut, červen 2005.
- [10] *Hliník a jeho slitiny.* [online]. [cit. 2012-03-10], Dostupné z: <http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf>
- [11] TKANÝ, J., *Svařování rozměrných hliníkových svařenců,* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 34s. Vedoucí bakalářské práce Ladislav Daněk
- [12] SKÝBA, P., *Hodnocení koroze u vybraných typů hliníkových slitin pro letecký průmysl,* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 84s. Vedoucí diplomové práce Bohumil Pacal
- [13] SONDEL, M., *Hliník a jeho slitiny.* Prezentace, ČSÚ Ostrava
- [14] Strojírenství pro střední školy, *Hliník a jeho slitiny.* [online]. [cit. 2012-03-10], Dostupné z: <<http://strojirenstvi-ucivo.blogspot.com/2011/04/321211-hlinik-jeho-slitiny.html>>
- [15] KOLEKTIV AUTORŮ, *Encyklopedie hliníku,* Prešov, 2005, Adin, 700 s., ISBN 80-89041-88-4

- [16] ORSÁGH, V., ORSÁGH, P., *Zváranie MIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava, 1998, Polygrafia SAV, 300 s., ISBN 80-88780-21-7
- [17] ČSN EN 573-1, *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 2: Označování chemickými značkami*. Praha: Český normalizační institut, červen 1996.
- [18] ČSN 42 0055, *Číselné označování těžkých a lehkých neželezných kovů*. Praha: Český normalizační institut, květen 1977
- [19] ŘASA, J., ŠVERCL, J., *Strojnické tabulky 2*, Brno, 2007, SCIENTIA, 586 s., ISBN 978-80-86960-20-3
- [20] ČSN EN 1780-1, *Hliník a slitiny hliníku – Označování slitinových hliníkových ingotů pro přetavení, předslitina a odlitků – Část 1: Číselné označování*. Praha: Český normalizační institut, červen 2003
- [21] AMARI, *Porovnání označení hliníkových slitin podle EN – ČSN – DIN*. [online]. [cit. 2012-03-13], Dostupné z: < <http://www.amari.at/website/fileadmin/pdf/Porovnan-oznaceni.pdf> >
- [22] СПЕЦ ЭЛЕКТРОД, *Лазерная гибридная сварка с применением электродов Спецэлектрод (часть 2)*. [online]. [cit. 2012-03-18], Dostupné z: < http://www.google.cz/imgres?imgurl=http://www.spetsselectrode.ru/download/stat6/3.jpg&imgrefurl=http://www.spetsselectrode.ru/download/stat6/laser_1.htm&usg=__HbjwDLxFS8yh6DdGUytDiDJlb8=&h=334&w=686&sz=19&hl=cs&start=1&zoom=1&tbnid=h0U0kZ8hN7AaRM:&tbnh=68&tbnw=139&ei=YW9bT66MGsPYtAbQlp2QDA&prev=/> >
- [23] MIG WELD, *Löslichkeit von Wasserstoff*. [online]. [cit. 2012-03-22], Dostupné z: < <http://www.migweld.de/service/schweissen-von-aluminium/wasserstoffloeslichkeit.html> >
- [24] KOUTNÝ, J., *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování*. [online]. [cit. 2012-03-25], Dostupné z: < <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf> >
- [25] ČSN EN ISO 6892-1, *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, únor 2010
- [26] MINAŘÍK, V., *Plamenové svařování*. Ostrava, 2001, ZEROSS, 130 s., ISBN 80-85771-83-7
- [27] KUBÍČEK, J., *Technologie svařování*. [online]. [cit. 2012-03-27], Dostupné z: < http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_vyroby_I__svarovani__kubicek.pdf >

- [28] HLAVATÝ, I., *Technologie I*. [online]. [cit. 2012-03-29], Dostupné z: <
http://fs1.vsb.cz/~hla80/Vyuka/2008_Technologie1.pdf>
- [29] SCHWARZ, D., *Plazmové, elektronové a laserové svařování*. Svět svaru 1/2010
- [30] *Označování hliníku a slitiny hliníku podle ČSN EN*. [online]. [cit. 2012-03-29],
Dostupné z: <http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/oznacovani_hliniku.pdf>
- [31] STRNADEL, B., *Nauka o materiálu II*. skripta VŠB-TU Ostrava, 2008, 276 s., ISBN
978-80-248-1842-9
- [32] GLEICH ALUMINIUM, *EN AW 6082*. [online]. [cit. 2012-04-6], Dostupné z: <
<http://www.gleich.de/cz/valcovane-desky/en-aw-6082-details/?generatepdf>>
- [33] ESAB, *Slitiny hliníku*. [online]. [cit. 2012-04-10], Dostupné z: <
<http://products.esab.com/Templates/T094.asp?id=72874>>
- [34] ČSN EN ISO 17637, *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných
svarů*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2011
- [35] ČSN EN ISO 10042, *Svařování – Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené
obloukovým svařováním – Určování stupňů jakosti*. Praha: Český normalizační
institut, srpen 2006
- [36] ČSN EN ISO 6520-1, *Svařování a příbuzné procesy – klasifikace geometrických vad
kovových materiálů – Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut,
leden 2008
- [37] ČSN EN 571-1, *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné
zásady*. Praha: Český normalizační institut, listopad 1998
- [38] ČSN EN 1435, *Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení svarových
spojů*. Praha: Český normalizační institut, červen 1999
- [39] ČSN EN 1321, *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a
mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Český normalizační institut, červenec 1998
- [40] ČSN EN ISO 4136, *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška
tahem*. Praha: Český normalizační institut, červenec 2011

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Mechanické a fyzikální vlastnosti hliníku Al 99,5 %	12
Tabulka 2 – Značení a pevnost základních hliníkových materiálů	18
Tabulka 3 – Součinitel odrazivosti hliníku	38
Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082.T6	44
Tabulka 5 – Chemické složení slitiny EN AW 6082.T6	44
Tabulka 6 – Typické mechanické vlastnosti čistého svarového kovu	45
Tabulka 7 – Typické chemické složení čistého svarového kovu	45
Tabulka 8 – Parametry svařování	48
Tabulka 9 – Parametry svařování	49
Tabulka 10 – VT – vyhodnocení vzorků	53
Tabulka 11 – PT – vyhodnocení vzorků	54
Tabulka 12 – RT – vyhodnocení vzorků	55
Tabulka 13 – Příčná zkouška tahem – vyhodnocení vzorků	58
Tabulka 14 – Zkouška makrostruktury – vyhodnocení vzorků	62
Tabulka 15 – Přehled provedených zkoušek (kromě tahové)	63
Tabulka 16 – Porovnání výsledků tahové zkoušky	64

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Fázový diagram systému Al – Mg	14
Obrázek 2 – Princip a časový průběh tepelného zpracování vytvrzováním	20
Obrázek 3 – Přirozené stárnutí - slitina EN AW 6262	21
Obrázek 4 – Umělé stárnutí - slitina EN AW 6262	22
Obrázek 5 – Rozpustnost vodíku v hliníku	24
Obrázek 6 – Závislost praskavosti na koncentraci legujícího prvku	25
Obrázek 7 – Vliv teploty předehřevu a PM na praskavost slitiny AlMg2	26
Obrázek 8 – Vliv předchozího ohřevu na tvrdost a pevnost stanovenou při 20 °C u slévárenské slitiny	27
Obrázek 9 – Svařování obalenou elektrodou	29
Obrázek 10 – Možnosti zapojení elektrody a vliv na průvar. a) DC – přímá polarita, b) DC – nepřímá.....	29
Obrázek 11 – Složení plynu a jeho vliv na průvar	31
Obrázek 12 – Schéma svařování metodou 141 s přidáváním drátu	32
Obrázek 13 – Tvary konců elektrod po broušení. a) ruční svařování - AC, b) ruční svařování - DC, c)	33
Obrázek 14 – Princip svařování metodou MIG	35
Obrázek 15 – Princip svařování metodou FSW.....	42
Obrázek 16 – Úprava svarových ploch – svařování MIG	46
Obrázek 17 – Úprava svarových ploch – svařování TIG.....	47
Obrázek 18 – Upnuté díly před svařováním	48
Obrázek 19 – Přímá vizuální kontrola. Značka <u>a</u> znázorňuje povolený rozsah úhlu pozorování.	51
Obrázek 20 – Jednoduchá měrka	52
Obrázek 21 – Víceúčelová měrka.....	52
Obrázek 22 – Princip radiografické kontroly, S – zdroj záření, F – film, b – vzdálenost objekt-film, t –.....	54
Obrázek 23 – Radiogram vzorku TIG 1	55
Obrázek 24 – Radiogram vzorku MIG 1	55
Obrázek 25 – Tvar zkušební tyče pro plechy	56
Obrázek 26 – Vysvětlení použitých symbolů pro zkušební tyč.....	57
Obrázek 27 – Prostor uvnitř zelených čar vyznačuje místa odběru vzorků TIG 1.1 a TIG 1.2. Černý	57

Obrázek 28 – Prostor uvnitř zelených čar vyznačuje místa odběru vzorků MIG 1.1 a MIG 1.2. Černý	58
Obrázek 29 – Zelený obdélník vyznačuje místa odběru vzorků MIG 2.1 a MIG 2.2. Černý pruh	59
Obrázek 30 – Zelený obdélník vyznačuje místa odběru vzorků MIG 2.1 a MIG 2.2. Černý pruh	59
Obrázek 31 – Makrostruktura svarového spoje, vzorek TIG 2.1	60
Obrázek 32 – Makrostruktura svarového spoje, vzorek TIG 2.2.....	61
Obrázek 33 – Makrostruktura svarového spoje, vzorek MIG 2.1	61
Obrázek 34 – Makrostruktura svarového spoje, vzorek MIG 2.2	62

Přílohy

Příloha 1	– Hutní atest (opis)
Příloha 2	– Atest přídavného materiálu (OK AUTROD 5087)
Příloha 3	– WPS (TIG)
Příloha 4	– WPS (MIG)
Příloha 5	– Protokol o zkoušce VT (TIG 1)
Příloha 6	– Protokol o zkoušce VT (TIG 2)
Příloha 7	– Protokol o zkoušce VT (MIG 1)
Příloha 8	– Protokol o zkoušce VT (MIG 2)
Příloha 9	– Protokol o zkoušce PT (TIG 1)
Příloha 10	– Protokol o zkoušce PT (MIG 1)
Příloha 11	– Protokol o zkoušce RT (TIG 1)
Příloha 12	– Protokol o zkoušce RT (MIG 1)
Příloha 13	– Protokol (příčná zkouška tahem)